

MAURÍCIO MARCHAND KRÜGER

**DIAGNÓSTICO DE ÁREAS  
CONTAMINADAS POR HIDROCARBONETOS  
- EXEMPLO DE UMA ÁREA URBANA EM CURITIBA -**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre. Curso de Pós-Graduação em Geologia, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Augustinho Rigoti

CURITIBA

2002

Krüger, Maurício Marchand

Diagnóstico de áreas contaminadas por hidrocarbonetos: exemplo de uma área urbana em Curitiba / Maurício Marchand Krüger. — Curitiba, 2002.

ix, 163 f. : il.; mapas, tabs.

Orientador: Augustinho Rigoti

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra.

1. Hidrocarbonetos – Contaminação – Curitiba (PR). 2. Geofísica. I. Rigoti, Augustinho. II. Título.

CDD 20 550

# TERMO DE APROVAÇÃO

**Maurício Marchand Krüger**

DIAGNÓSTICO DE ÁREAS

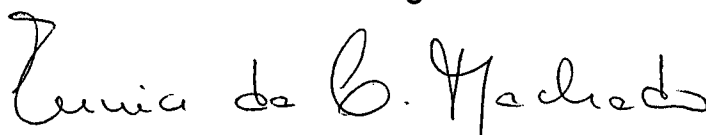
CONTAMINADAS POR HIDROCARBONETOS

- EXEMPLO DE UMA ÁREA URBANA EM CURITIBA -

Dissertação de Mestrado aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Geologia, área de concentração em Geologia Ambiental, da Universidade Federal do Paraná, Comissão formada pelos Professores:



Professor Doutor Jorge Luís Porsani -USP



Professora Doutora Eunice da Costa Machado - UFPR



Professor Doutor Augustinho Rigoti - UFPR  
Presidente

Curitiba, 13 de dezembro de 2002.

É preciso aprender a navegar  
em um oceano de incertezas  
em meio a arquipélagos de  
certeza.

***Edgar Morin***



## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu orientador, Prof. Augustinho Rigoti, por não ter medido esforços à realização deste trabalho, incentivando-me em todos os momentos;

A todos os colegas da Angel – Geologia e Meio Ambiente, em especial na pessoa de Hilton Lucio, por ter valorizado a proposta da avaliação científica da área de estudos;

A RFFSA, por ter cedido a área de estudos,

Aos incansáveis colegas Marcio Jose da Silva, Eduardo de Mio, Caezar Rigoti, Adriane F. de Campos e Marcelo K. Bartoszeck, sem os quais não teriam sido possíveis os levantamentos de campo,

Ao Prof. Jorge Luis Porsani e Geól. Leandro Moutinho, pela disposição em me auxiliar nos levantamentos GPR e seu pós-processamento;

Ao IAG – Instituto Astronômico e Geofísico – USP, pelo acesso ao equipamento GPR;

Ao IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo pela disposição do programa de modelamento geoeletrico;

Ao SENAI / CETSAN – PR, nas pessoas de Rosângela M. Handa e Luciano Avila, pelo apoio na realização de parte das amostragens químicas;

Ao CNPq, pelo apoio financeiro através da concessão da bolsa de estudo;

A meus familiares, por terem sempre me disponibilizado o suporte que me permitiu chegar até aqui;

A minha esposa Andrea Doria, pelo companheirismo demonstrado, fiel paciência nos momentos mais difíceis e permanente estímulo à conclusão deste estudo.

<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>VI</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>VII</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>VIII</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>IX</b>
<b>1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS .....</b>	<b>10</b>
<b>2. MÉTODOS GEOFÍSICOS: HISTÓRICO, DEFINIÇÕES E APLICAÇÕES .....</b>	<b>13</b>
2.1. O QUE É GEOFÍSICA AMBIENTAL? .....	13
2.2. TÉCNICAS GEOELÉTRICAS.....	15
2.2.1 SEV – Sondagem Elétrica Vertical .....	23
2.2.2 Caminhamento Elétrico.....	24
2.2.3 Tomografia Elétrica 2D e 3D (ERT – Electrical Resistance Tomography).....	26
2.2.4 “SB – Screening Body” .....	30
2.2.5 Potencial Espontâneo (SP – Self Potential).....	30
2.3. GEO-RADAR - GPR.....	32
<b>3. CARACTERÍSTICAS DO SUBSOLO E FUNDAMENTOS HIDROGEOLÓGICOS.....</b>	<b>45</b>
3.1. FORMAÇÃO E ESTRUTURA DA ZONA AERADA .....	45
3.2. A ÁGUA SUBTERRÂNEA NO CONTEXTO HIDROLÓGICO .....	47
3.3. AQUÍFEROS: CLASSIFICAÇÃO E ASPECTOS RELEVANTES .....	48
3.4. CONCEITOS HIDROGEOLÓGICOS DE ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS.....	49
3.4.1 Lei de Darcy .....	49
3.4.2 Condutividade Hidráulica .....	50
3.4.3 Transmissividade.....	52
3.4.4 Velocidade da água subterrânea .....	52
<b>4. CONTAMINAÇÃO DE SOLO / ÁGUAS SUBTERRÂNEAS POR HIDROCARBONETOS .....</b>	<b>53</b>
4.1. CENÁRIO ATUAL E POLÍTICA NACIONAL .....	53
4.2. POSSÍVEIS FASES PRESENTES .....	55
4.3. TRANSPORTE EM SUB-SUPERFÍCIE .....	57
4.4. CONDIÇÕES DE DETECTABILIDADE PELOS MÉTODOS GEOFÍSICOS UTILIZADOS .....	59
4.4.1 Técnicas de Eletrorresistividade.....	59
4.4.2 Geo-Radar - GPR.....	62
4.5. A BIODEGRADAÇÃO COMO FATOR DE ALTERAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DOS CONTAMINANTES.....	65
<b>5. PROCEDIMENTOS DE CAMPO – MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>69</b>
5.1. IDENTIFICAÇÃO DA ÁREA .....	69
5.1.1 Histórico da contaminação na área de estudo .....	69
5.1.2 Geomorfologia e geologia local .....	72
5.1.3 Hidrogeologia local.....	75
5.1.4 Características dos contaminantes .....	78
5.2. AQUISIÇÃO GEOFÍSICA E PROCESSAMENTO DOS DADOS .....	80
5.2.1 Técnicas de Eletrorresistividade.....	80
5.2.2 Geo-Radar - GPR.....	82
5.3. AMOSTRAGEM.....	85
<b>6 ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS .....</b>	<b>90</b>
6.1 TÉCNICAS DE ELETRORRESISTIVIDADE.....	90
6.2 GEO-RADAR - GPR.....	96
6.3 ANÁLISES QUÍMICAS .....	104
<b>7 DISCUSSÃO .....</b>	<b>107</b>
<b>8 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>118</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>121</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>156</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. mapa de localização.....	p.12
Figura 2. espaço homogêneo sendo energizado por um eletrodo pontual.....	p.19
Figura 3. arranjo <i>Schlumberger</i> .....	p.21
Figura 4. desenho esquemático das medidas de numa SEV.....	p.24
Figura 5. arranjo Dipolo-Dipolo.....	p.25
Figura 6. aquisição GPR por afastamento constante.....	p.33
Figura 7. arranjo CMP ( <i>commom midpoint</i> ).....	p.38
Figura 8. relação entre velocidade e frequência para diferentes condutividades.....	p.39
Figura 9. relação entre atenuação e frequência para diferentes condutividades de materiais com constante dielétrica 4.....	p.40
Figura 10. comparação entre frequências de antenas.....	p.41
Figura 11. formas de propagação das ondas GPR.....	p.43
Figura 12. migração de hidrocarbonetos menos densos do que a água.....	p.46
Figura 13. possíveis fases presentes de hidrocarbonetos.....	p.56
Figura 14. fotos aéreas comparativas de três períodos distintos.....	p.71
Figura 15. modelo esquemático da área de estudos.....	p.74
Figura 16. mapa potenciométrico em 10/09/2002.....	p.77
Figura 17. cromatograma gasoso demonstrando os limites aproximados para individuais produtos de hidrocarbonetos.....	p.79
Figura 18. mapa de localização dos pontos amostrados.....	p.89
Figura 19. sondagem elétrica vertical nº 7.....	p.93
Figura 20. sondagem elétrica vertical nº 9.....	p.94
Figura 21. seções modelo de resistividade.....	p.95

Figura 22. mapa de localização dos perfis GPR.....	p.98
Figura 23. perfis paralelos de GPR.....	p.99
Figura 24a. perfil transversal de GPR – T1.....	p.100
Figura 24b. perfil transversal de GPR – T2.....	p.101
Figura 24c. perfil transversal de GPR – T3.....	p.102
Figura 24d. sondagem GPR – CMP.....	p.103
Figura 25a. comparação da seção de caminhamento elétrico e perfil GPR (2).	p.112
Figura 25b. comparação da seção de caminhamento elétrico e perfil GPR (3).	p.113
Figura 25c. comparação da seção de caminhamento elétrico e perfil GPR (4).	p.114
Figura 25d. comparação da seção de caminhamento elétrico e perfil GPR (5).	p.115
Figura 25e. comparação da seção de caminhamento elétrico e perfil GPR (6).	p.116
Figura 26. mapa de resistividade em camadas.....	p.117

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. propriedades elétricas de materiais geológicos.....	p.35
Tabela 2. sumário dos métodos geofísicos na delineação de produtos sob as fases livre e residual.....	p.65
Tabela 3. níveis d'água verificados nos poços piezométricos.....	p.75
Tabela 4. resultados analíticos das amostras de solo.....	p.86
Tabela 5. resultados analíticos das amostras de água subterrânea.....	p.87
Tabela 6. resultados analíticos das amostras de solo provenientes de furo de sondagem.....	p.88
Tabela 7. valores orientadores para solos contaminados.....	p.105
Tabela 8. valores orientadores para água subterrânea contaminada.....	p.106

## RESUMO

Métodos geoeletricos medindo a resistividade em corrente contínua e o método eletromagnético GPR (*Ground Penetrating Radar*) foram utilizados no diagnóstico de uma área urbana em Curitiba impactada por derrame de diesel e lançamentos de efluentes oleosos, oriundos de uma oficina de manutenção de locomotivas. A área de estudo encontra-se em terreno alagadiço, característico da planície de inundação do rio Iguaçu. Seu perfil geológico é constituído por uma camada de solo orgânico com 1,5 metros de espessura, seguida por uma camada de argila plástica (0,5 m) e de um pacote arenoso saturado em água (2,5 m). Estas camadas encontram-se sobrepostas a um espesso pacote argiloso de natureza elétrica muito condutora sobreposta ao embasamento cristalino. O caminhamento elétrico foi realizado com arranjo dipolo-dipolo e espaçamento entre eletrodos de 5 e 10 metros, totalizando 14 níveis de investigação. A seção geoeletrica até o embasamento foi bem caracterizada em suas unidades maiores tanto pelo caminhamento elétrico como pelas sondagens elétricas verticais, mas camadas finas e descontínuas, que interessam ao estudo, não foram resolvidas com os espaçamentos utilizados. O levantamento com GPR, embora com a profundidade de investigação limitada a 7 metros, apresentou melhor resolução para camadas finas superficiais, importantes para a caracterização do problema. Com os perfis GPR identificou-se nitidamente uma pluma de natureza condutiva que se inicia na atual mancha impactada, visível em superfície e concordante com o gradiente hidráulico. Tal feição é distinguida pela ausência de sinais de reflexão. Os resultados analíticos de amostras de solo e água dos parâmetros BTXE e PAH's indicaram a inexistência ou baixos níveis de contaminação. Pontos que ainda apresentavam algum teor de contaminação mostraram também grandes concentrações de bactérias. Isto comprova que os contaminantes foram biodegradados, justificando que, ao invés de uma pluma contaminante de natureza elétrica resistiva, seja observada uma pluma de natureza condutora. Com base nos resultados conclui-se que os métodos geofísicos podem delimitar áreas impactadas e monitorar os processos de biodegradação dos hidrocarbonetos. Contudo, tais ferramentas não podem prescindir de sondagens de calibração e de análises químicas comprobatórias.

## ABSTRACT

DC resistivity methods and GPR (Ground Penetrating Radar) were used to investigate a hydrocarbon contaminated site in the Metropolitan Curitiba. Contaminants are mainly diesel and other oleaginous products of locomotive maintenance. The study area is on the swampy region of the Iguaçu river inundation plain. Organic soil constitutes the top 1.5 m of the geological section. Following is a plastic clay layer (0.5 m) and a water saturated sandy unit (2.5 m). A thick, very conductive clayey unit underlies these layers until the basement. The resistivity profiling was carried out with the dipole-dipole array, 5 and 10 m spacing, totaling 14 levels of investigation, providing a complete resistivity imaging. The major geoelectric units until the basement were very well characterized. However, some thin and non continuous layers, which are of interest to the study, were not resolved with the spacing used. The GPR investigation, particularly with the 100 Mhz antenna, despite the limited depth of investigation (7 m), exhibited the best resolution for the thin near surface layers, important for the problem characterization. GPR profiles allowed for the identification of a conductive plume, starting where contamination is seen at the surface, spreading according to the hydraulic gradient. Such a feature is revealed by the attenuation of the GPR signal. Analytic results of soil and water samples, examined for BTXE and PAH's parameters, indicate very low or non existent contamination. In places where there was some contamination, it was also observed high bacteria concentration. This shows that contaminants have been biodegraded, explaining the electrically conductive plume instead of the expected resistive one. Based on the results here presented, one concludes that geophysics can delineate impacted areas and can be used to monitor the hydrocarbon biodegradation processes. There is however a need for these exploration tools to be calibrated by direct investigation and chemical analyses to check results.

## **1. Introdução e Objetivos**

Juntamente com a crescente preocupação da população e dos órgãos ambientais com a qualidade dos recursos hídricos subterrâneos, aumentam também os investimentos em novas tecnologias e sistemas de detecção e monitoramento dos mesmos, tornando-os cada vez menos custosos e invasivos.

Seguindo esta tendência, a utilização de técnicas geofísicas como o Georadar (GPR – abreviação de “Ground Penetrating Radar”) e diversas técnicas geoelétricas, mais comumente através do emprego da corrente contínua e múltiplas configurações eletródicas, tornam-se cada vez mais comuns.

Atualmente, a investigação do subsolo e águas subterrâneas contaminadas por compostos orgânicos (hidrocarbonetos) é feita através de técnicas diretas, como sondagens e poços de monitoramento, e também através de técnicas indiretas, com destaque especial para os métodos geofísicos, que apresentam vantagens em termos de custo e rapidez, mas não podem prescindir das técnicas diretas, seja na calibragem da interpretação ou na parametrização dos ensaios.

Apesar de todo avanço recente observado nas aparelhagens geofísicas supracitadas, melhorando em muito a resolução espacial em pequenas profundidades e o não menos impressionante desenvolvimento dos ensaios elétricos nos levantamentos de eletrorresistividade ditos 2D e 3D, que combinados ao GPR compõem uma ferramenta essencial na investigação da contaminação por hidrocarbonetos, as técnicas ainda apresentam limitações, algumas relacionadas à instrumentação, ainda em desenvolvimento, outras ligadas ao seu emprego em áreas urbanas, nas quais os ruídos eletromagnéticos e as interferências de superfície prejudicam ou até impedem a sua utilização.

Deve-se considerar também que as respostas elétricas e eletromagnéticas dos poluentes orgânicos dependem da idade da contaminação e das condicionantes geológicas e hidrogeológicas, como a própria porosidade e a permeabilidade do aquífero.

Dentre as diversas fontes ou atividades potencialmente geradoras de contaminação dos recursos hídricos subterrâneos, destacam-se aquelas de cunho localizado, como nas áreas industriais, através de derrames propositalis ou acidentais; pátios de abastecimento e postos de serviços, cuja contaminação pode ocorrer tanto por constantes e sucessivos derrames superficiais junto às bombas de combustível, bocais e ilha de enchimento, como também devido à ocorrência de vazamentos em componentes dos SASC's (sistemas de armazenamento subterrâneo de combustíveis), devido a sua má construção e selamento ou corrosão. Contaminações esparsas e de maior porte podem também ocorrer em maiores concentrações em aeroportos e refinarias, colocando em risco a saúde humana e o meio ambiente (Whiteley, 1995).

Com base na importância do tema supracitado, a presente pesquisa foi conduzida com vistas a desenvolver novos conceitos e técnicas relacionadas à temática, abrangendo em especial, aquelas ligadas à geofísica.

O objetivo final do trabalho é investigar a eficiência das técnicas geofísicas empregadas, através da conciliação de diversas sistemáticas e recursos geofísicos disponíveis, visando a otimização e a redução dos custos envolvidos nos trabalhos de detecção, monitoramento e remediação de áreas contaminadas por vazamentos de hidrocarbonetos, tema que arca na atualidade com onerosas despesas de campo e laboratório.

Neste sentido, optou-se pela realização dos ensaios de campo numa base de abastecimento ferroviário localizada dentro do perímetro urbano da cidade de Curitiba – Estado do Paraná, e relativamente próxima ao importante Rio Iguaçu (figura 1). Neste local, durante cerca de vinte e cinco anos, a área de seu entorno - de relevo mais baixo e lençol freático aflorante - recebeu os efluentes gerados (após tratamento primário) por duas gerações de caixas separadoras água e óleo, provenientes de pequenos derrames de abastecimento de diesel e produtos de lavagem de locomotivas, como graxa e lubrificantes. Tal procedimento, outrora ambientalmente aceitável e não mais permitido atualmente pelas rígidas legislações ambientais, gerou uma pluma de contaminação envolvendo uma extensa área e que se encontra em processo de biodegradação - motivo do presente estudo.



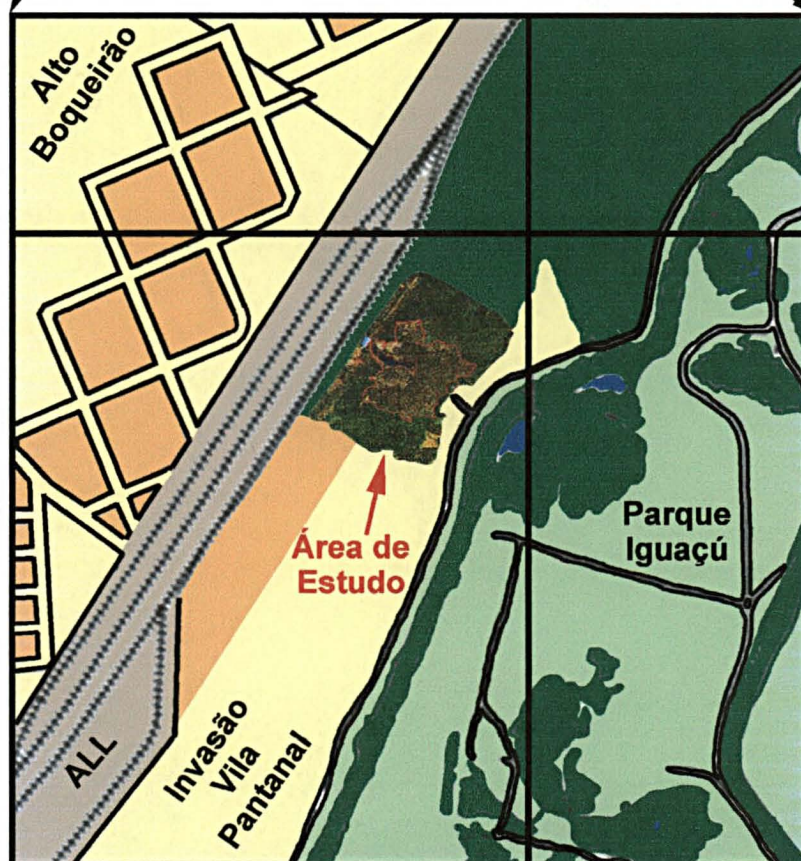


Figura 1 - mapa de localização (modificado de IPPUC, 2001)

## **2. Métodos Geofísicos: histórico, definições e aplicações**

### **2.1. O que é Geofísica Ambiental?**

A geofísica ambiental tem sido geralmente citada como a grande ferramenta do futuro, baseada na plena evidência de que ainda existirão em diversas regiões do globo focos de poluição ambiental e de que os métodos geofísicos podem ser aplicados na sua detecção e delimitação (Hendersen, 1993).

Mas afinal, em que difere a geofísica ambiental da tradicional geofísica utilizada na exploração mineral e petrolífera? Primeiramente as condições dos locais avaliados encontram-se em constante mudança, por se tratarem geralmente de ambientes urbanos, nos quais a interferência cultural exerce forte influência. Não menos importante, os levantamentos normalmente são realizados em espaços confinados ou limitados, sujeitos a constantes interferências eletromagnéticas (tratam-se dos grandes limitadores dos trabalhos de campo da geofísica ambiental) e sob complexas condições geológicas em sub-superfície (além dos alvos ambientais serem muito menores do que os tradicionais alvos da exploração mineral).

Segundo Greenhouse & Gudjurgis (1995), a geofísica ambiental nada mais é do que um novo contexto para uma antiga matéria; baseia-se em sua maioria nos princípios e métodos conhecidos e praticados por décadas pela geofísica tradicional, porém direcionada para problemas ambientais resultantes dos nossos tempos.

A finalidade da geofísica ambiental é prover uma ampla visão de sub-superfície que complemente informações localizadas oriundas de sondagens, de maneira não invasiva, localizando o alvo procurado sem necessariamente penetrá-lo, o que pode ser muito importante em situações de resíduos perigosos ou quando a perfuração poderia agravar a situação presente, em especial quando coexistem camadas, lentes ou aquíferos contaminados e não contaminados sobrepostos.

Os resultados diretos destes levantamentos geofísicos são normalmente convertidos em mapas representativos da distribuição no tempo e no espaço de alguma propriedade física avaliada, como a condutividade elétrica ou sua recíproca, a resistividade elétrica, para daí então serem traduzidos para os parâmetros buscados, como porosidade, permeabilidade ou contaminação das águas subterrâneas. Apesar destes resultados serem apenas uma peça do “quebra-cabeça”, servem com certeza como guia nas primeiras fases de uma investigação detalhada.

No caso do alvo do estudo ser uma pluma de contaminação, os objetivos da investigação poderão ser sua extensão areal, o detalhamento de seus contornos superiores e inferiores ou apenas observar seu comportamento durante um dia, semanas ou até mesmo anos. Se o objetivo for reconhecer o meio geológico no qual a pluma de contaminantes está inserida, as técnicas geofísicas auxiliarão na separação entre ambientes distintos, como terrenos argilosos, depósitos superficiais inconsolidados, rocha fraturada impermeável ou ambiente cárstico. No entanto, o objetivo do trabalho poderá ser o reconhecimento das propriedades do alvo e se estas criarão ou não uma condição de fundo que permita mapear os contaminantes com certos métodos geofísicos.

Apesar de todo o avanço alcançado atualmente nas técnicas e equipamentos envolvidos com a geofísica ambiental, ela ainda é desconhecida mesmo daqueles que trabalham com o meio-ambiente. Torna-se portanto essencial que os geofísicos optem sempre pela clareza da temática, demonstrando abertamente suas capacidades e limitações, além de buscarem formas de apresentação que permitam que os dados sejam claros e inteligíveis a possíveis e futuros usuários, ainda não ambientados com estas ferramentas.

Dentre as técnicas usualmente utilizadas na geofísica ambiental, discutem-se a seguir algumas das mais aptas a operar em casos de contaminações por hidrocarbonetos.

## **2.2. Técnicas Geoeletricas**

Na natureza, os diferentes materiais existentes são caracterizados por diferentes propriedades elétricas, dentre elas a resistividade elétrica, refletindo a dificuldade que um certo material oferece à passagem de uma corrente elétrica.

Os métodos que avaliam a distribuição da resistividade elétrica no subsolo são chamados de “métodos de eletrorresistividade” e medem uma impedância elétrica, cuja interpretação conseqüentemente permite avaliar a geologia de sub-superfície. Neste sentido, as rochas ígneas e metamórficas possuem tipicamente alta resistividade, dependendo logicamente de seu grau de fraturamento e da porcentagem de fraturas preenchidas com água subterrânea. Já as rochas sedimentares, caracteristicamente de maior porosidade, quando saturadas em água, apresentam baixos valores de resistividade, assim como os solos úmidos e a própria água subterrânea. Com relação aos solos secos, quando argilosos normalmente demonstram menores valores de resistividade do que os solos arenosos, entretanto é comum a sobreposição de valores de resistividade entre todas as diferentes classes de solos e rochas, devido aos inúmeros fatores inter-relacionados, como a porosidade, grau de saturação em água e, em especial, a concentração de sais dissolvidos.

A salinidade das águas de percolação é portanto fator determinante da condutividade de uma rocha ou sedimento, de maneira que os íons que conduzem a corrente eletroliticamente ao longo de poros interconectados, resultam da dissociação de sais na água. Seguindo este raciocínio, quanto maior a porosidade local, maior a quantidade de água salina que percola o meio, resultando num maior número de íons livres para se movimentar na água de preenchimento (cabe ressaltar que o termo “água salina” não possui relação com a água salgada, mas sim com o teor de sais dissolvidos na água, provenientes da dissolução de elementos químicos do solo e dos meios rochosos, como o Na e Ca, pelos quais a água percolou).

A resistividade elétrica pode ser relacionada à porosidade pela Lei de Archie (Archie, 1942), quando estão ausentes os minerais de argila (devido a sua capacidade condutora), segundo a fórmula abaixo:

$$F = \rho_r / \rho_e = a\phi^{-m} \quad (1)$$

Na equação 1,  $F = \rho_r / \rho_e$  refere-se ao *fator de formação da rocha*; sendo  $\rho_r$  a *resistividade da rocha*;  $\rho_e$  (sub-índice denota eletrólito) a *resistividade da solução nos poros* e  $\phi$  a *porosidade*, enquanto “ $a$ ” e “ $m$ ” são constantes características do tipo de rocha em questão. A constante “ $m$ ” é também reportada como *fator de cimentação da rocha*, com valores normalmente entre 0.6 e 1.0, e a constante “ $a$ ” como *coeficiente de saturação da rocha*, com valores entre 1.4 e 2.2, sendo que, quanto maior o grau de cimentação da rocha, maior será o expoente negativo “ $m$ ” na equação.

Esta mesma equação para arenitos pode ser expressa por:

$$F = 0.62\phi^{-2.15} \quad (2)$$

Como a Lei de Archie admite, a textura da rocha e/ou de seus sedimentos constituintes é um fator condicionante da maior ou menor capacidade do meio em propagar uma determinada corrente elétrica. Num exemplo, um arenito selecionado, com grãos minerais de igual tamanho apresentará um maior volume de espaços vazios para a circulação da substância eletrolítica (água com sais), apresentando conseqüentemente uma resistividade relativamente menor; por comparação direta, um arenito não tão bem selecionado possuirá um grau inferior de porosidade, o que por conseqüência apresentará uma resistividade relativamente maior.

Outro importante fator atuante nos trabalhos de prospecção geolétrica diz respeito ao efeito dos minerais de argila sobre a resistividade elétrica. As partículas desta classe de minerais possuem uma dupla camada de cátions, sendo uma destas *fixa* (imóvel) e adjacente à superfície do mineral; já a outra, de comportamento *difuso*, apresenta um decréscimo exponencial de densidade com a distância a partir

da camada fixa, sendo portanto livre para se movimentar sob a influência de um campo elétrico.

Este efeito causa um aumento da condutividade do meio, através do aumento da densidade de transportadores de cargas elétricas, pela adição dos cátions da camada difusa à concentração iônica normal presente na água de preenchimento.

Em lugar da lei de Archie, a resistividade de uma rocha composta por minerais de argila pode ser expressa através da equação:

$$\rho_r = \frac{\rho_w F_t}{1 + \rho_w BQ} \quad (3)$$

Na equação 3,  $\rho_w$  é a resistividade da água nos poros,  $B$  é o fator de dependência da mobilidade dos cátions,  $Q$  é a capacidade de troca catiônica da argila por unidade de volume, e  $F_t$  é o fator de formação para altas concentrações, para as quais os efeitos dos minerais de argila podem ser desprezados (*fator verdadeiro de formação*). Para se considerar a presença da argila, pode-se representar um fator de formação aparente a partir da equação acima citada, como:

$$F_a = \frac{\rho_r}{\rho_w} = \frac{\rho_w F_t}{1 + \rho_w BQ} \quad (4)$$

Com relação unicamente à propriedade física chamada “resistividade elétrica”, a mesma pode ser definida pela equação:

$$\rho = R \times S / L (\text{Ohm} \cdot m) \quad (5)$$

Onde:  $R$ = resistência;  $S$ = seção transversal do condutor e  $L$ = comprimento do condutor.

Da mesma forma, a condutividade ( $\sigma$ ) caracteriza-se como o inverso da resistividade:

$$\sigma = 1/\rho (\text{Siemen} / m) \quad (6)$$

No que diz respeito aos mecanismos de propagação das correntes elétricas, estes podem ser do tipo condução eletrônica ou iônica, a primeira quando se trata de metais e semicondutores, e a segunda com eletrólitos sólidos e líquidos.

A condução eletrônica ocorre pelo transporte de elétrons, sendo nas rochas ou solo regida pelo grau de agregação das partículas e/ou minerais metálicos e teor de impurezas. A condução iônica ocorre devido ao deslocamento dos íons presentes na água contida nos poros vazios e fissuras das rochas em sub-superfície; neste caso, sua magnitude pode ser caracterizada como uma função decrescente dos sais dissolvidos e da porosidade total comunicante presente na rocha.

Sinteticamente, a utilização em campo das técnicas geoeletricas iniciou-se na década de 20, através dos trabalhos dos irmãos *Schlumberger* e seu funcionamento em campo consiste na aplicação de uma corrente elétrica no subsolo, utilizando-se de aparelho específico (resistivímetro), de maneira a medir-se a resistividade em sub-superfície.

A razão entre a voltagem medida e a corrente transmitida é entendida como a impedância da porção da terra através da qual a corrente se propaga. Tal procedimento se dá através da utilização de eletrodos de corrente (pelos quais a corrente é transmitida ao solo), e de eletrodos de potencial, através dos quais é medida uma diferença de potencial criada pela passagem da corrente.

Para melhor compreendermos a teoria envolvida, consideremos um eletrodo pontual (posicionado na origem  $O$  de um sistema de coordenadas) energizando um espaço homogêneo (figura 2) e eletricamente isotrópico, no qual a corrente elétrica flui radialmente na superfície esférica  $S$ . Dada a superfície  $S$  igual a  $4\pi r^2$ , a densidade de corrente  $J$  à distância  $r$  é igual a:

$$J_r = \frac{I}{4\pi r^2} \quad (7)$$

Onde,  $I$  representa a corrente elétrica em ampères.

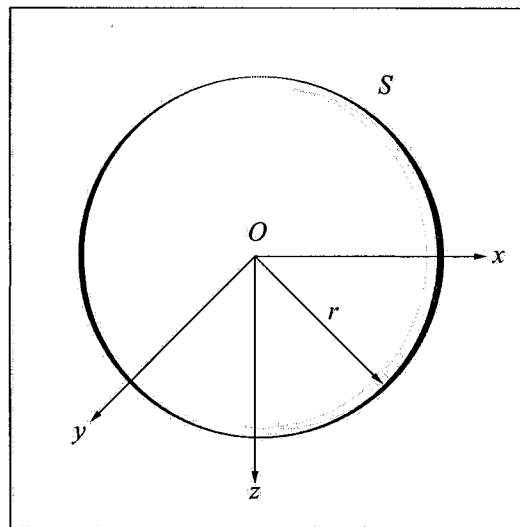


Figura 2 – espaço homogêneo sendo energizado por um eletrodo pontual

A Lei de Ohm

$$J = \sigma E = \frac{1}{\rho} E \quad (8)$$

Onde  $E$  expressa o campo elétrico, pode então ser assim representada:

$$E_r = J_r \rho = \frac{I\rho}{4\pi r^2} \quad (9)$$



O potencial  $V$  de interesse, à distância  $r$  do eletrodo é determinado pela integral de  $E$ , entre  $r$  e o infinito, como:

$$V \int = E_r dr = \frac{I\rho}{4\pi r} \quad (10)$$

No caso de o eletrodo encontrar-se na superfície de um semi-espaco, a corrente elétrica fluirá radialmente através de um hemisfério de raio  $r$  e área de superfície  $2\pi r^2$ , portanto, a densidade de corrente e o potencial para o mesmo serão definidos como:

$$J_r = \frac{I}{2\pi r^2} \quad (11)$$

$$V = \frac{I\rho}{2\pi r} \quad (12)$$

As funções potenciais são escalares, propiciando desta forma a sua adição aritmética. Como na realidade precisa-se de no mínimo dois eletrodos para transmitir a corrente para a terra (o primeiro pelo qual a corrente entra e o segundo por onde a corrente sai) de maneira a fechar-se o circuito, como representado na figura 3, o potencial total em um ponto de medição pode ser obtido pela adição das contribuições individuais de cada fonte.

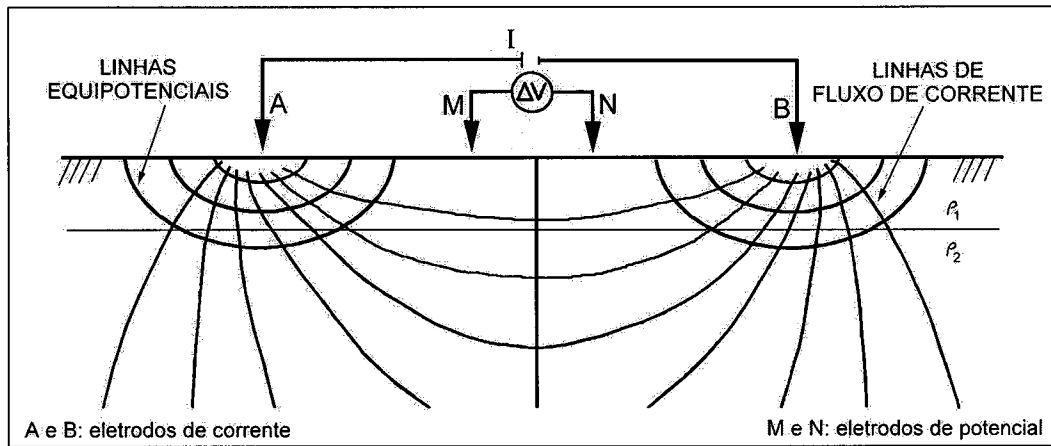


Figura 3 – Arranjo Schlumberger

Portanto, a resistividade aparente em função da diferença de potencial  $\Delta V$  medida na superfície da terra heterogênea e anisotrópica, entre os eletrodos  $M$  e  $N$  e da corrente ( $I$ ) transmitida, é expressa como:

$$\rho_a = K \cdot \Delta V / I (\text{Ohm} \cdot m) \quad (13)$$

Sendo  $I$  = intensidade da corrente elétrica e  $K$  um fator geométrico dependente do espaçamento entre os quatro eletrodos, calculado através da equação:

$$K = \frac{2\pi}{(1/r_{AM} - 1/r_{BM} + 1/r_{BN} - 1/r_{AN})} \quad (14)$$

Na equação 14,  $r_{BN}$  e  $r_{AN}$  são as respectivas distâncias entre o eletrodo de potencial  $N$  e os eletrodos de corrente  $A$  e  $B$ ; os sinais negativos são referentes à troca de sinal da corrente elétrica entre os eletrodos.

Finalmente, para se obter a resistividade real das camadas em sub-superfície, necessita-se utilizar de técnicas de inversão, nas quais, através de programas específicos, procura-se o modelo capaz de reproduzir os dados adquiridos.

A técnica da inversão é muito importante, pois facilita a interpretação das pseudo-seções, já que muitas vezes mudanças laterais dos valores da resistividade aparente podem ser freqüentemente mal interpretadas como mudanças verticais da resistividade em profundidade (Loke, 1999).

Os métodos geoelétricos, dos quais fazem parte os métodos de eletrorresistividade, normalmente permitem determinar a extensão da contaminação na água subterrânea e estimar as condições hidrogeológicas dominantes, como sua estrutura, parâmetros de filtração e migração, velocidade de fluxo e direção dos contaminantes, parâmetros relacionados às resistividades e espessuras do meio.

Dentre as técnicas ditas de eletrorresistividade, diversos são os arranjos utilizados, sendo a seguir descritos os mais importantes.

### 2.2.1 SEV – Sondagem Elétrica Vertical

Consiste na medição da resistividade aparente utilizando uma separação crescente entre os eletrodos de corrente, mantendo-se fixo o centro do arranjo, assim como a sua orientação. É mais utilizado em investigações verticais.

Ao se aumentar o distanciamento entre os eletrodos de corrente, aumenta-se a profundidade em que a corrente se propaga, alcançando-se profundidades maiores, relacionando portanto a profundidade com as diferenças de resistividade medidas (figura 4).

Os dados da SEV são apresentados em curva bilogarítmica (ver anexo I), com a resistividade aparente em Ohm.m na vertical (eixo das ordenadas) e as distâncias entre os eletrodos de corrente ( $AB/2$ ) em metros na horizontal (eixo das abscissas).

Dentre os arranjos mais utilizados na SEV, destaca-se o *Schlumberger* (figura 3), no qual o espaçamento entre eletrodos obedece a relação  $MN \leq AB/5$ . Tal arranjo comprovou-se como de menor sensibilidade aos ruídos naturais e artificiais e às variações laterais da resistividade. Cabe lembrar que os eletrodos A e B, também chamados de  $C_1$  e  $C_2$ , são emissores de corrente, e os eletrodos M e N ou  $P_1$  e  $P_2$  são detectores de voltagem, classificados como eletrodos de potencial.

Com relação a sua utilização na detecção de plumas de contaminação geradas por hidrocarbonetos menos densos que a água (LNAPL's), a mesma é considerada relativamente limitada, devido à pequena espessura das camadas de contaminantes com relação a todo o pacote litológico observado. Mazác *et al* (1990) esclarece que a sondagem elétrica vertical, ao ser empregada em áreas contaminadas por derivados de petróleo, possui maior confiabilidade na detecção de mudanças temporais nos campos geoeletricos, ao invés da obtenção de medidas absolutas relacionadas a presença ou não dos contaminantes, sendo portanto mais direcionada ao monitoramento das possíveis variações que venham a ocorrer após a contaminação.

Acworth (2001), reforça ainda que esta técnica é a melhor opção na determinação da profundidade do embasamento em regiões com extensas camadas intemperizadas e uma pequena variação lateral na resistividade aparente.

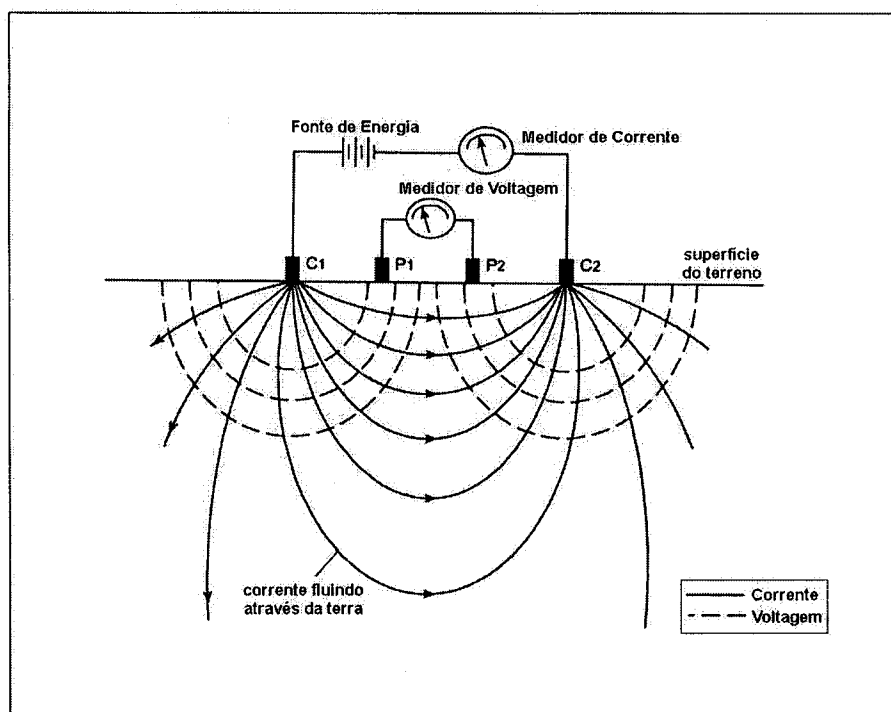


Figura 4 – desenho esquemático das medidas numa SEV (EPA, 1997)

### 2.2.2 Caminhamento Elétrico

Nesta técnica, a partir de um sequenciamento de leituras realizado em superfície sobre um traçado longitudinal, onde os eletrodos de corrente e de potencial são mantidos sob espaçamentos constantes e todo o conjunto de quatro eletrodos avança à medida que cada novo ponto é ocupado, diversos níveis em profundidade são investigados sob um ângulo de 45° (figura 5). Devido a profundidade máxima investigada ser aproximadamente o dobro do espaçamento entre eletrodos, esta técnica é mais utilizada na observação de variações laterais.

É também amplamente utilizada na determinação da interface zona não saturada/zona saturada, na análise das variações da quantidade de água em pacotes ou camadas sedimentares e direções do fluxo d'água subterrânea, assim como na determinação de contatos geológicos.

Diversos são os arranjos possíveis na técnica de Caminhamento Elétrico; como exemplo, no arranjo chamado Dipolo-Dipolo (figura 5), um dos mais utilizados, o par de eletrodos de potencial é deslocado em perfil numa mesma direção e sob um espaçamento constante, permitindo que diversos níveis sejam medidos, dependendo do número de deslocamentos do arranjo e da resposta elétrica em sub-superfície.

Outros arranjos podem ser utilizados, como o Pólo-Dipolo, no qual um dos eletrodos de corrente (A) acompanha os de potencial (M e N), enquanto o outro (B) é mantido afastado no "infinito" no mínimo 10 vezes a maior distância da linha AN.

O eletrodo considerado como no "infinito" se encontra distante do ponto de medida, sendo desprezível sua influência no potencial lido, servindo apenas para fechar o circuito terra-eletrodos.

Neste arranjo o dipolo dos eletrodos de potencial é mantido com intervalo constante, afastando-se do eletrodo de corrente (A) em intervalos regulares.

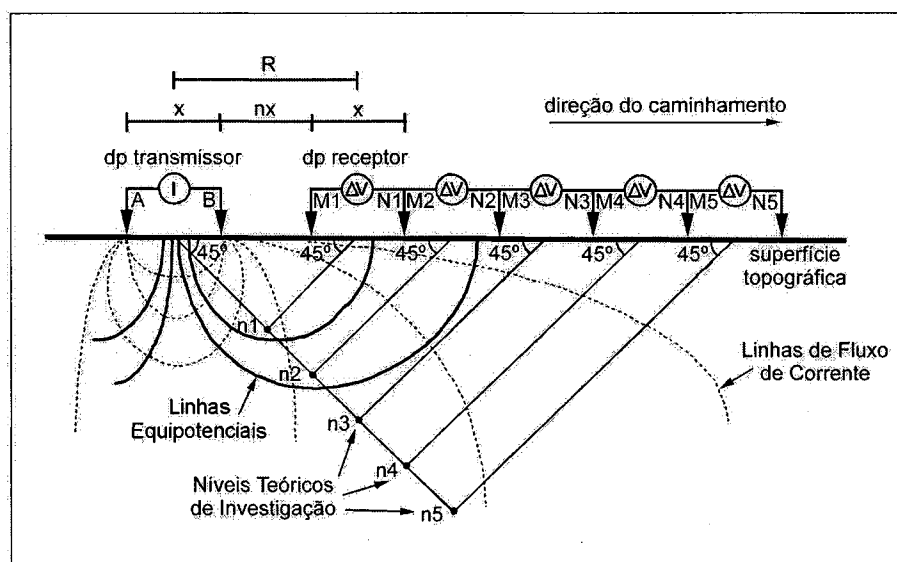


Figura 5 - arranjo Dipolo-Dipolo (Borges, 2002)

### **2.2.3 Tomografia Elétrica 2D e 3D (ERT – Electrical Resistance Tomography)**

Devido às limitações dos métodos tradicionais de resistividade com relação à detecção das variações horizontais da resistividade em sub-superfície, o meio técnico-científico vem buscando novas técnicas que permitam modelos mais acurados e que levem em consideração as variações tanto na vertical, como na horizontal, já que a geologia em sub-superfície comumente apresenta complexas relações entre camadas e feições, reflexo de um ambiente real que varia sob três dimensões.

Nesta busca, a partir da teoria básica proposta vinte anos antes na modalidade de imageamento médico, Lytle & Dines no ano de 1978, iniciaram a utilizá-la como uma ferramenta de imageamento geoelétrico (Daily & Ramirez, 2000). Em especial nos últimos anos, desenvolveram-se ainda mais os estudos do uso do imageamento/tomografia 2D e 3D em áreas de caráter geológico mais complexo ou em locais onde a visualização integral da sub-superfície fosse requerida, como por exemplo, nas questões ambientais ou onde a segurança de pessoas e do ambiente estivesse envolvido. Este melhoramento da técnica como um todo ocorreu face ao desenvolvimento das técnicas computacionais e de instrumentação, permitindo que os equipamentos de aquisição de dados e algoritmos de inversão também fossem rapidamente melhorados.

Enquanto que levantamentos 1D usualmente utilizam 10 a 20 medidas, aqueles denominados 2D podem envolver de 100 a 1000, chegando a muitas centenas ou milhares de medidas nos levantamentos 3D (Loke, 1999). Segundo Acworth (2001), as técnicas de imageamento 2D e 3D são altamente eficazes por serem capazes de demonstrar concomitantemente as resistividades das zonas rasas e profundas, através da utilização num mesmo levantamento de espaçamentos distintos entre eletrodos.

Esta classe de levantamentos pode ser utilizada em conjunto com outras técnicas ou formas de levantamentos, como o GPR (*Ground Penetrating Radar*), de maneira a proverem-se informações complementares locais, servindo de apoio a

monitoramentos geotécnicos e de movimentação de contaminantes (Santamarina, 1994).

Da mesma forma como para as técnicas de Sondagem Elétrica Vertical (SEV) ou Caminhamento Elétrico anteriormente descritas, deverão ser avaliadas as características do arranjo a ser utilizado, considerando em especial a sua sensibilidade para variações verticais e horizontais, a profundidade de investigação e cobertura de dados, além da intensidade do sinal.

Nesta dissertação é melhor abordada a utilização das técnicas 2D, comprovadamente em muitos casos de melhor relação custo-benefício, em especial quando empregada em áreas maiores. Em breve, os custos envolvidos serão substancialmente reduzidos através do aprimoramento e utilização de leitores multi-canais, o que irá reduzir os tempos de leitura em campo, fator ainda comprometedor da utilização desta sistemática, já que sua característica principal é a manipulação de um grande volume de dados e demorados pós-processamentos (White *et al*, 2001).

Nestas técnicas é mais comum a utilização dos arranjos pólo-pólo, pólo-dipolo e dipolo-dipolo, porque outros arranjos possíveis evidenciam uma perda de definição e cobertura próximo aos limites laterais dos perfis e malhas.

#### ARRANJO PÓLO-PÓLO

Trata-se de um dos arranjos mais comumente utilizados em levantamentos 2D e 3D. Diferencia-se dos demais por apresentar um eletrodo de corrente e um eletrodo de potencial no infinito, ou seja, mantidos afastados dos eletrodos do centro do arranjo e em direções opostas por uma distância não inferior a vinte vezes a máxima separação entre C1 (A) e P1 (M). Este afastamento pode proporcionar a interferência de correntes telúricas, de origem natural, geradas pelas tempestades solares e que podem vir a produzir ruídos degradantes da qualidade dos sinais.

Em levantamentos ditos 3D, o arranjo geralmente é utilizado em malhas de pequeno porte (10x10 ou menores), com espaçamento entre eletrodos também



relativamente pequenos (inferiores a 5 metros), apresentando uma ampla cobertura horizontal e grande profundidade de investigação, entretanto com inferior resolução (Loke, 1999).

Neste arranjo, o número máximo de possíveis medidas de resistividade independentes ( $N_{MAX}$ ) realizáveis com  $N_e$  eletrodos é dado por:

$$N_{MAX} = N_e (N_e - 1)/2 \quad (15)$$

Como exemplo, num arranjo quadrado de 5x5, representando um total de 25 eletrodos, serão possíveis 300 medições, enquanto que num arranjo de 10x10 (100 eletrodos) são possíveis 4.500 medidas, o que torna relevante a definição da malha, pois dobrando-se a sua dimensão, multiplica-se em muito o tempo de levantamento em campo e pós-processamento dos dados.

Cada eletrodo do conjunto é utilizado como eletrodo de corrente e de potencial, sendo as medidas realizadas em todas as direções possíveis.

### ARRANJO PÓLO-DIPOLO

Utilizado em levantamentos 2D, e 3D com malhas de dimensões médias a grandes (12x12 ou maior), apresenta melhor definição que o arranjo pólo-pólo e é menos afetado pelas correntes telúricas.

Uma limitação na sua utilização é devido a se apresentar como um arranjo assimétrico, já que somente um eletrodo (de corrente) acompanha o caminhamento, tornando-se de difícil interpretação.

## ARRANJO DIPOLO-DIPOLO

Amplamente utilizado nos levantamentos 2D ao longo de perfis, é recomendado somente para arranjos 3D de grande porte (maiores que 12x12) devido à pobre cobertura horizontal nos limites da malha. Apresenta como desvantagem a pequena amplitude de sinal (o que pode ser resolvido aumentando-se o espaçamento entre eletrodos), sendo no entanto muito utilizado por ser um arranjo simétrico, mais versátil e de mais fácil interpretação.

Dentre as técnicas de otimização dos levantamentos 3D e passíveis de serem utilizadas em ambos os arranjos (Pólo-Pólo; Pólo-Dipolo e Dipolo-Dipolo), nas quais, por exemplo, necessita-se de uma redução do número de medidas por questões diversas, sem degradar sobremaneira a qualidade dos resultados esperados, está o método da diagonal cruzada (*“cross diagonal survey”*).

Neste método somente realizam-se medidas nas direções “x”, “y” e “45°”, desde que a diagonal cruze o eletrodo de corrente, reduzindo em quase um terço o número pontos medidos.

Com a redução do número de medidas, o modelo apresentará uma pior resolução, em especial naquelas localizadas nos limites do modelo que se busca determinar através da inversão.

Na impossibilidade de se dispor de todos os eletrodos necessários à realização de uma malha completa, pode-se utilizar a técnica *“roll-along”*, que consiste na subdivisão de uma malha maior em malhas menores, nos quais são lidas alternadamente as direções “x” e “y”. As direções “45°” poderão ser lidas também alternadamente em sentidos opostos, em ambos os sentidos, ou até mesmo serem eliminadas em determinadas situações onde realmente necessita-se da otimização das leituras, ou quando o elevado tempo de realização das leituras seja uma preocupação.

Complementarmente podem ainda ser realizadas medidas em somente uma direção, caracterizado-se como levantamentos 2D paralelos, os quais depois de invertidos individualmente e interpolados, poderão gerar um pseudo-modelo 3D.

#### **2.2.4 “SB – Screening Body”**

Trata-se também de um método elétrico, no qual um dos eletrodos de corrente é colocado sob a camada contaminada, utilizando-se de um furo de sondagem a trado que intercepte o nível d'água, já que os combustíveis menos densos que a água (LNAPL's) praticamente flutuam sobre a mesma.

Como todos os métodos geoeletricos, a possibilidade de detecção da camada resistiva de óleo por este método está diretamente ligada às propriedades de resistividade e geometria do aquífero e meio rochoso (Mazác *et al*, 1990), apresentando no entanto uma melhor resolução do que outros métodos mais tradicionais, como a própria sondagem elétrica vertical (SEV), fazendo com que o contorno das plumas de contaminação seja claramente detectado.

#### **2.2.5 Potencial Espontâneo (SP – Self Potential)**

Trata-se de um método simples e antigo, inicialmente utilizado para a exploração mineral, a partir do ano 1966. Recentemente tem encontrado aplicação também em levantamentos ambientais, com uma boa relação custo-benefício em investigações iniciais, antecedendo estudos mais detalhados.

Diversos estudos indicam que poderia ser utilizado no auxílio ao mapeamento de concentrações de contaminantes em sub-superfície, baseando-se unicamente na detecção da voltagem gerada pelo alvo e seus arredores, portanto de maneira passiva, sem a indução de corrente elétrica externa (Greenhouse & Gudjurgis, 1995).

Seus dados consistem de diferenças de potencial elétrico natural, sendo necessário extremo cuidado na sua aquisição, partindo de uma correta configuração e procedimentos de campo, assim como de um prévio conhecimento das

características de campo associadas com fontes de ruído, sejam elas artificiais ou naturais.

Estas fontes de ruído podem ser constantes ou variáveis no tempo. Podem ter período de minutos, horas, dias ou até anos, podendo variar de 10 a 100 Hz em áreas urbanizadas. Seu reconhecimento torna-se portanto de vital importância, já que podem ser confundidas com anomalias de interesse.

Estes efeitos tornam-se acentuados quando a fonte a ser pesquisada apresenta baixos níveis de sinal, sendo ainda mais potencializados em locais urbanizados, o que torna necessário freqüentemente a utilização de técnicas de filtragem.

Ruídos também podem estar presentes caso o eletrodo base localize-se no centro da área de levantamento. Se por um lado se tem economia de cabos quando o eletrodo de referência está no centro da área, por outro se pode ter ruídos pela polarização dos eletrodos, pela mudança na temperatura da solução condutora entre ambos os eletrodos (são normalmente as maiores causas das variações na leitura através do tempo, chegando a valores de até 20mV (Corwin, 1990), ou pela variação da química e/ou composição do solo local, quando os sinais lidos são de poucas dezenas de mV.

Nos trabalhos de campo, o nível de referência nos levantamentos SP pode ser fornecido por uma estação afastada da área provável de localização do alvo.

Medidas comparativas, conduzidas no início e fim do levantamento podem ser utilizadas para subtrair erros de polarização ou de deriva do SP.

Potenciais eletroquímicos entre áreas com composições químicas distintas de preenchimento dos poros das zonas saturadas podem ser classificados como ruídos desejáveis, quando a intenção é justamente o mapeamento de contaminantes. No entanto, suas amplitudes não passam de uma dezena de mV.

Outra interessante utilização da técnica SP é a determinação do fluxo das águas subterrâneas e sua direção preponderante, através do movimento de cargas elétricas e respectiva geração de diferenças de potencial.

Corwin (1990) salienta que nas configurações possíveis de levantamento, utilize-se como convenção, que o terminal negativo do aparelho de medição esteja conectado ao eletrodo da estação base do levantamento e o terminal positivo seja conectado ao eletrodo da estação de medição; da mesma forma orienta quanto à necessidade de reocupação dos pontos de amarração entre diferentes linhas de levantamento, de maneira a serem verificados possíveis erros de leitura.

Um levantamento SP pode ser feito com a técnica da base fixa ou com a técnica de gradientes. Na primeira, um eletrodo de referência é mantido fixo. Com isto gera-se um mapa de diferenças de potencial elétrico com relação ao potencial do ponto base. Na técnica de gradientes, mede-se sucessivamente a diferença de potencial entre pares de eletrodos ao longo de linhas.

### **2.3. Geo-Radar - GPR**

O Geo-Radar - GPR, abreviatura de *Ground Penetrating/Probing Radar*, ou Radar de Penetração no Solo, é um método eletromagnético de investigação relativamente recente. Foi amplamente desenvolvido após a segunda guerra mundial, a partir do aperfeiçoamento dos conceitos de reflexão das ondas do radar aeronáutico. Sua melhor característica é que a diferencia das demais é a grande resolução do imageamento de sub-superfície, que ocorre de maneira similar à sísmica de reflexão. Opera contudo em profundidades rasas, caracterizando-se como uma ferramenta de apoio ao mapeamento das contaminações e materiais geológicos próximos à superfície.

Sua operação é relativamente simples, sendo os dados armazenados diretamente em meio magnético digital. Suas antenas, diferentemente do radar aeronáutico, operam apontadas para o solo, liberando ondas eletromagnéticas que podem operar individualmente em frequências que variam em média de 10 Mhz a 1 Ghz. Seu princípio operacional consiste na emissão de ondas para o solo através da antena transmissora; estas se propagam até atingirem feições, camadas ou objetos

com diferentes propriedades elétricas, quando parte da energia é refletida para a superfície, sendo então captada pela antena receptora.

Quando se trata de materiais geológicos, suas propriedades elétricas serão basicamente controladas pela presença de água. No caso do solo, ele pode ser compreendido como um sistema composto de três fases principais: matriz do solo, ar e água, ocorrerá conseqüentemente uma grande variação nas características elétricas dos materiais, dependendo da quantidade de água e ar presentes nos poros da matriz de solo (Strieder, 2000).

O levantamento com GPR se dá através do deslocamento contínuo do par de antenas sobre o solo, seja pelo transporte manual ou com o apoio de veículos de transporte, manuais ou motorizados. A transmissão e recepção dos dados ocorre normalmente sob distâncias fixas durante o transporte das antenas, sistema este denominado de aquisição por afastamento constante (figura 6), sendo por exemplo de 30 cm (Daniels & Roberts, 1994) para arranjos biestáticos com frequência de 500 MHz, e de 1 metro para arranjos biestáticos com frequência de 100 MHz. Cabe frisar que este sistema será melhor detalhado adiante.

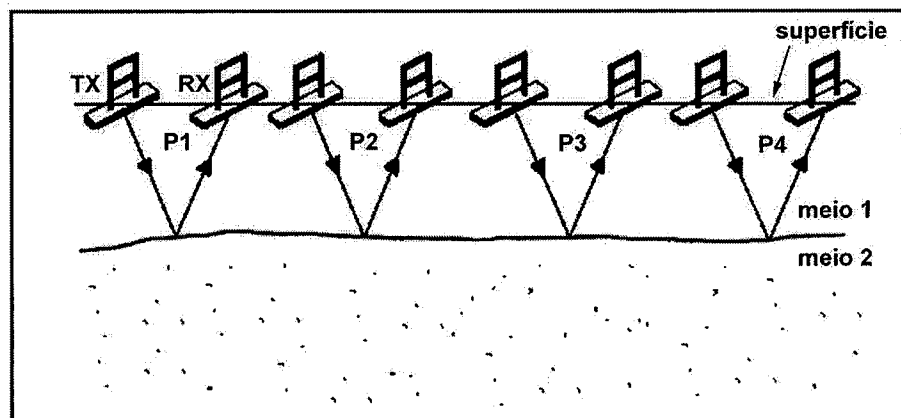


figura 6 – aquisição GPR por afastamento constante (modificado de Aquino, 2000)

A unidade utilizada para a velocidade das ondas eletromagnéticas é o metro/nanosegundo (m/ns; 1 nanosegundo= $10^{-9}$  segundos). No ar, este tempo é de aproximadamente 0,305 m/ns, já na água ela pode variar dependendo da constante

dielétrica da água, girando normalmente entre 0,033 e 0,50 m/ns. Os perfis GPR são então expressos verticalmente em tempo de percurso de ida e volta da onda em nanosegundos, e horizontalmente em unidades métricas de deslocamento. Quando se conhece a velocidade da onda em sub-superfície, pode-se da mesma forma identificar a profundidade do objeto ou feição refletiva através da equação:

$$P = \frac{vt}{2} (m) \quad (16)$$

Na equação 17,  $P$  é a profundidade do objeto,  $t$  é o tempo de percurso de ida e volta da onda, e  $v$  a sua velocidade.

Uma condicionante primária da velocidade da onda em sub-superfície é a Permissividade Relativa ou Constante Dielétrica ( $K$ ), obtida pela razão da permissividade do meio ou material ( $\epsilon$ ) em relação à permissividade do ar (espaço livre) ( $\epsilon_0$ ):

$$K = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (17)$$

A Constante Dielétrica reflete a capacidade de um material isolante armazenar cargas elétricas (polarizar-se), podendo variar de 1 para o ar até 81 para a água. Abaixo do nível freático, a constante dielétrica é de aproximadamente 25, valor não incomum para rochas sedimentares. Cabe ressaltar que a condução elétrica somente ocorre nos materiais que possuem cargas livres para se mover, sendo predominante nas baixas frequências, enquanto que a polarização ocorre em todos os materiais existentes, predominantemente sob altas frequências, não deixando de ser entretanto uma forma de condução.

A tabela 1 mostra os valores da constante dielétrica, condutividade elétrica, velocidade e atenuação do sinal para a maioria dos materiais geológicos mais comuns, a uma frequência de 100 Mhz.

Tabela 1 – propriedades elétricas de materiais geológicos (Davis & Annan, 1989)

MATERIAL	CONSTANTE DIELÉTRICA $\epsilon$	CONDUTIVIDADE ELÉTRICA $\sigma$ (mS/m)	VELOCIDADE $v$ (m/ns)	ATENUAÇÃO $\alpha$ (dB/m)
AR	1	0	0,3	0
ÁGUA DESTILADA	80	0,01	0,033	$2 \times 10^{-3}$
ÁGUA FRESCA	80	0,5	0,033	0,1
ÁGUA DO MAR	80	$3 \times 10^3$	0,01	$10^3$
AREIA SECA	3-5	0,01	0,15	0,01
AREIA SATURADA	20-30	0,1-1	0,06	0,03-0,3
CALCÁREO	4-8	0,5-2	0,12	0,4-1
FOLHELHO	5-15	1-100	0,09	1-100
SILTITO	5-30	1-100	0,07	1-100
ARGILA	5-40	2-1000	0,06	1-300
GRANITO	4-6	0,01-1	0,13	0,01-1
SAL SECO	5-6	0,01-1	0,13	0,01-1
GELO	3-4	0,01	0,16	0,01

Segundo Davis & Annan (1989), quando se considera simultaneamente a propagação e a atenuação das ondas, torna-se importante tratar a constante dielétrica ou permissividade dielétrica relativa como variável complexa, representada pela soma das partes real e imaginária:

$$K^* = K' + iK'' \quad (18)$$



Onde  $K'$  é a parte real da constante dielétrica, referente aos fenômenos de propagação e reflexão, e  $K''$  a parte imaginária, referente à atenuação da onda.

A permeabilidade magnética do meio ( $\mu$ ) também é considerada como uma condicionante primária, sendo definida como um fator de proporcionalidade entre o vetor indução magnética ( $B$ ) e a intensidade do campo magnético ( $H$ ).

$$B = \mu H \quad (19)$$

A unidade do vetor intensidade do campo magnético ( $H$ ) é Weber/m<sup>2</sup>, enquanto que a do vetor indução magnética ( $B$ ) é Ampère/m<sup>2</sup> (em geral se considera a permeabilidade magnética da maioria dos materiais geológicos como igual à do vácuo, devido à mesma não sofrer mudanças significativas, exceto em raros casos de altas concentrações de magnetita) (Dehaini, 2001).

Tomando-se por base que o GPR opera a partir da aplicação de um campo elétrico no meio geológico, a corrente que flui em resposta é proveniente de correntes de condução ( $J_c$ ), controladas pela condutividade, e de correntes de deslocamento ( $J_d$ ), controladas pela constante dielétrica. Matematicamente, as correntes de deslocamento estão defasadas 90° em relação às correntes de condução, refletindo que, devido à mudança de fases entre correntes, a primeira trata-se de um mecanismo de dissipação de energia e a outra de armazenamento de energia. Dependendo da razão de mudança do campo elétrico, um dos dois tipos de corrente pode dominar na resposta, sendo que, em altas frequências, observa-se que o comprimento de onda gerado depende basicamente da constante dielétrica e independe da condutividade (Dehaini, 2001).

O parâmetro que indica a eficácia da propagação de uma onda eletromagnética num meio é chamado de “indicador de qualidade” ( $Q$ ):

$$Q = \rho \varepsilon \omega \quad (20)$$

Na equação 21,  $\rho$  é a resistividade elétrica,  $\epsilon$  a permissividade dielétrica e  $\omega$  a frequência angular, dada por:

$$\omega = 2\pi f \quad (21)$$

Onde  $f$  é a frequência.

O inverso do “indicador de qualidade” ( $1/Q$ ) é conhecido como “tangente de perda”; se  $Q > 1$ , a onda propagar-se-á de forma eficaz, sem demonstrar perdas apreciáveis de energia em grandes distâncias; se  $Q < 1$ , a onda será atenuada numa distância pequena (Strieder, 2000).

No que diz respeito à análise da velocidade, a partir das medidas realizadas com o GPR obtém-se o tempo de percurso de ida e volta do sinal proveniente de uma reflexão sob o ponto amostrado; portanto, para se estimar a profundidade atingida necessita-se conhecer a velocidade de propagação do sinal no meio. Uma das maneiras é realizar-se uma sondagem WARR ou CMP (figura 7) para a verificação da velocidade do sinal. Pode-se também utilizar de velocidades presentes na literatura técnica ou na experiência prática adquirida, ou finalmente, utilizar-se de medições da constante dielétrica dos materiais em questão em laboratório, definindo então a velocidade.

Quando se conhece a permissividade relativa do meio e se utiliza a velocidade de propagação da onda de radar no ar ( $\cong 0,305\text{m/ns}$ ), a velocidade da onda no meio pode ser adquirida pela equação:

$$\text{Velocidade da Onda} = \frac{\text{velocidade da onda de radar no ar}}{\sqrt{\text{permissividade relativa do meio}}} \quad (22)$$

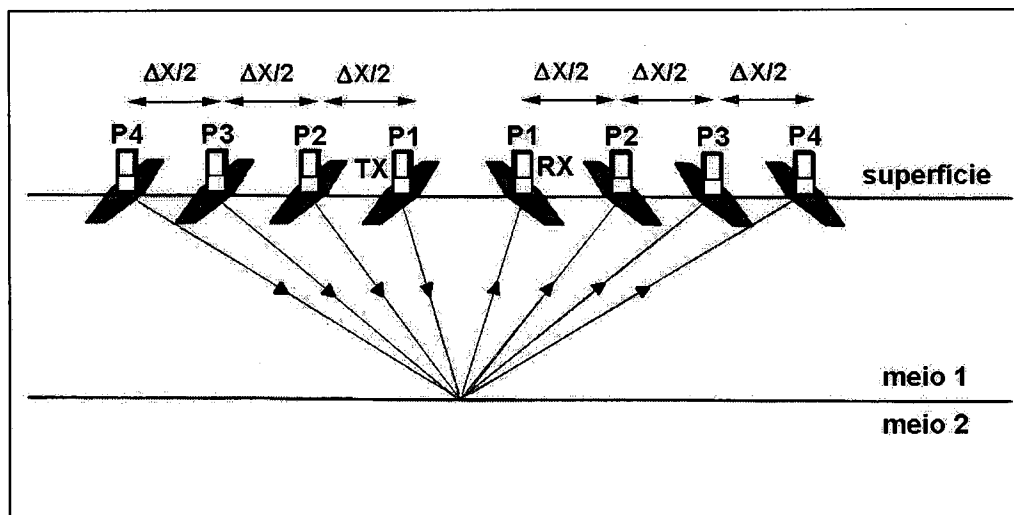


Figura 7 – arranjo CMP (*common midpoint*) (modificado de Aquino, 2000)

A figura 8 mostra a relação entre a velocidade e a frequência para diferentes condutividades. Fica claro no gráfico que a velocidade do sinal permanece constante e o sinal não é disperso entre  $10^6$  e  $10^9$  Hz para condutividades menores que 1000 mS/m, motivo pelo qual os sistemas de Geo-Radar operam nesta faixa de frequência. O aumento da velocidade do sinal observado no gráfico para frequências maiores que  $10^9$  Hz, ocorre devido essencialmente à relaxação da molécula de água (Davis & Annan, 1989).

Dentre as feições que causam uma mudança abrupta da velocidade e condutividade no sinal GPR, gerando as reflexões registradas pelo aparelho, encontram-se as cavidades vazias no subsolo, túneis, mudanças na geologia e porosidade das rochas, nível d'água (segundo Strieder (2000), uma parte significativa da energia de um pulso eletromagnético de radar incidente será refletida no nível freático) e a presença de hidrocarbonetos, em especial os de densidade menor do que a água ou LNAPL's (light nonaqueous phase liquids), por flutuarem sobre o nível d'água e possuírem uma constante dielétrica distinta do meio. Cabe frisar que a constante dielétrica anteriormente citada é reduzida pela adição de hidrocarbonetos (Whiteley, 1995). Através desta técnica, da mesma forma podem ser localizados tanques e tubulações.

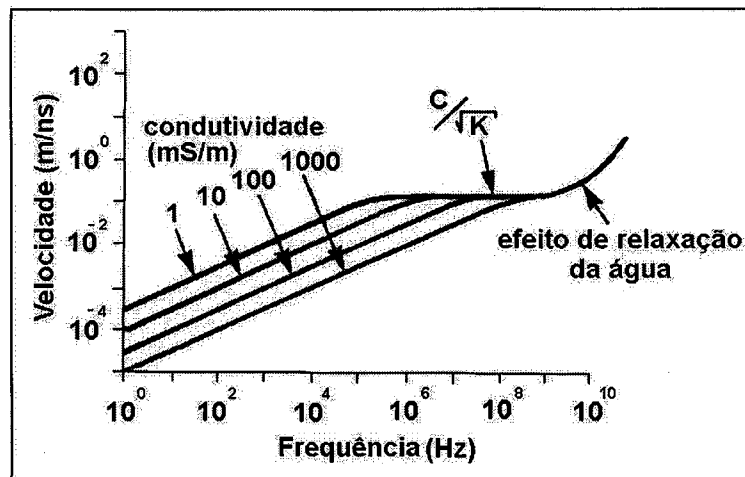


Figura 8 – relação entre velocidade e frequência para diferentes condutividades (Davis & Annan, 1989)

As reflexões acima citadas são caracterizadas como anomalias, sendo estas função da forma, dimensão e profundidade das feições e/ou objetos. Quando a espessura de uma camada ou objeto diminui, sua capacidade refletora também diminui, no entanto uma forte reflexão pode ser originada de uma camada extremamente fina, disposta entre duas camadas espessas, mas de mesmas propriedades dielétricas. Adicionalmente, cabe citar que a rugosidade da interface entre dois materiais distintos afetará também a refletividade. Quando estes refletores caracterizam-se por planos horizontais, como o nível d'água ou estratos individualizados, são classificados como de uma dimensão, podendo ser também de duas (objetos com curvaturas geram anomalias bidimensionais) ou três dimensões.

A figura 9 retrata a relação entre a frequência e a atenuação do sinal para diferentes condutividades de materiais geológicos com constante dielétrica 4. Esta atenuação permanece praticamente constante para meios geológicos com diferentes condutividades nas faixas de frequência utilizadas pelo Geo-Radar, aumentando no entanto rapidamente acima de 100 Mhz, devido à relaxação da água, que ocorre a 10 Ghz. A conversão de energia radiada em energia calorífica devido às perdas por condução elétrica, a difusão química em minerais de argila, a presença de heterogeneidades pequenas ou objetos comparáveis a, ou menores do que o

comprimento de onda dominante do pulso de radar, como também extremidades agudas, podem também aumentar a atenuação do sinal Geo-Radar, gerando o chamado “espalhamento de sinal”, ou na língua inglesa, “*scattering*”.

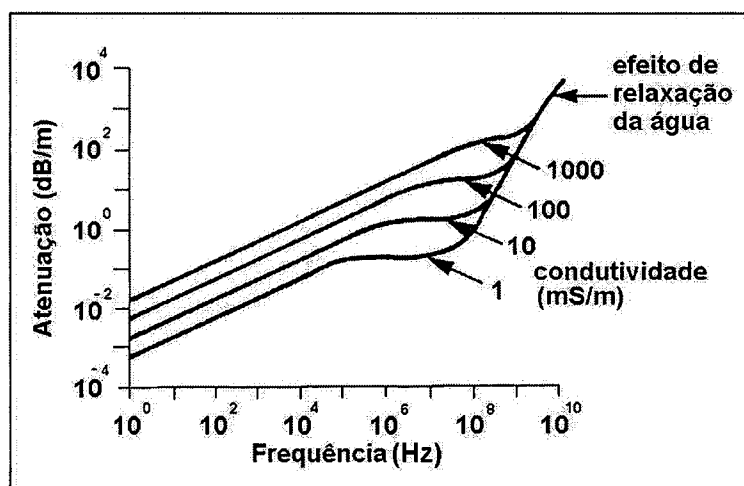


Figura 9 – relação entre a atenuação e frequência para diferentes condutividades de materiais com constante dielétrica 4 (Davis & Annan, 1989)

A escolha da antena a ser utilizada deverá ocorrer sempre após uma avaliação da profundidade que se deseja alcançar, assim como da resolução requerida, já que as de alta frequência (>200 Mhz) possuem baixa capacidade de penetração, gerando no entanto imagens de alta resolução. Por outro lado, antenas de baixa frequência perdem em resolução, mas ganham em penetração. A figura 10 retrata esta relação, utilizando-se de três antenas com frequências distintas (100, 300 e 500 Mhz) em levantamentos sobre areia saturada, onde é possível se observar a variação do grau de detalhamento das feições. Independente da relação resolução x profundidade de penetração, deverá ser considerado que as ondas no subsolo serão sempre exponencialmente atenuadas.

O tamanho da antena dependerá em especial da duração do pulso transmitido, conhecido como “largura de pulso”. Na prática, uma antena de GPR não emite um único pulso, mas uma sucessão contínua de pulsos, os quais possuem idêntica forma e duração, normalmente entre 1 e 100 ns, ocorrendo a intervalos

regulares de 2 a 50  $\mu$ s. O inverso do intervalo entre dois pulsos sucessivos é a frequência de repetição ( $f_r$ ), tipicamente entre 20 e 500 KHz (Strieder, 2000).

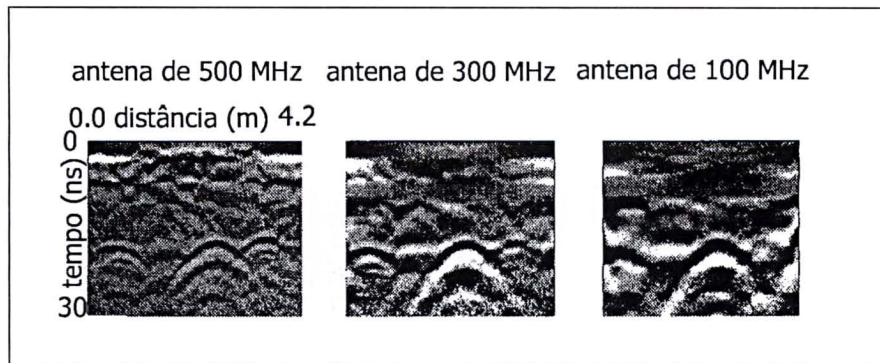


Figura 10 – comparação entre frequências de antenas  
(modificado de Daniels *et al*, 1995)

No intervalo entre dois pulsos sucessivos, a antena receptora afere o campo eletromagnético refletido de forma analógica, sendo automaticamente ampliado e convertido para a forma digital que será armazenada numa unidade de computador. A duração do tempo no qual as reflexões são armazenadas entre dois pulsos sucessivos é chamada de “janela de tempo”, sendo selecionável em quase todos os aparelhos GPR.

A orientação das antenas no solo também é fator fundamental na qualidade dos sinais obtidos, já que ao serem excitadas e por possuírem um eixo maior, geram radiações polarizadas paralelas à sua maior dimensão. Esta distribuição de energia no solo corresponde a uma elipse perpendicular ao eixo longitudinal da antena. Estudos demonstram que tanques alongados e tubos metálicos caracterizam-se como fortes refletores quando o eixo maior das antenas é paralelo ao eixo dos objetos em sub-superfície (Daniels & Roberts, 1994), enquanto que em arranjos em “T” ou com ângulo de 90°, grande parte dos ruídos da sub-superfície geológica são eliminados ou atenuados, fazendo com que os hidrocarbonetos ou líquidos contaminantes sejam realçados (Daniels, 2000).

Em solos com elevada concentração de argilas, normalmente os sinais são atenuados, devido a sua alta condutividade e conseqüente absorção de energia, resultando em limitação da profundidade de penetração; em solos e rochas homogêneas sem água, os alcances podem ser de mais de 35 metros, no entanto variam de 10 a 15 metros em média, utilizando-se uma antena de 75 Mhz, e podem não passar de dois metros para antenas de 200 Mhz ou mais (Gögh, Pattantys-Á. & Prónay, 1994).

A blindagem das antenas de alta freqüência é cada vez mais utilizada, devido em especial à grande interferência que os ruídos externos podem causar, principalmente nos levantamentos em grandes centros urbanos. Isto não acontece com as antenas de baixa freqüência, devido à dificuldade de absorção das ondas longas, gerando problemas apenas devido ao seu tamanho, que pode chegar até 4 metros, bem como na grande separação necessária entre as antenas transmissora e receptora (Gögh, Pattantys-Á. & Prónay, 1994).

Embora as unidades de transmissão e recepção sejam sistemas a parte, as duas antenas podem encontrar-se fisicamente juntas, portanto uma mesma antena pode ser utilizada para a transmissão e recepção dos sinais, num arranjo caracterizado como “monoestático”. O contrário, quando se utilizam antenas em separado, é chamado de arranjo “biestático”.

Esta configuração (biestática) pode ser do tipo cruzada (*cross-line*), na qual as antenas encontram-se paralelas, no entanto transversais ao perfil; ou do tipo alinhada (*in-line*), com seus eixos longitudinais paralelos ao perfil.

Na aquisição de dados Geo-Radar, as ondas observadas são ondas diretas no ar, ondas diretas no solo e ondas refletidas e refratadas, como mostrado na figura 11.

Dentre as técnicas de amostragem, normalmente utiliza-se o “caminhamento de reflexão”, também chamado de “aquisição em afastamento constante”, onde o conjunto de antenas desloca-se a cada medida registrada, mantendo a distância de separação entre antenas, de maneira a se investigar as mudanças geológicas laterais ou os limites de feições de interesse.

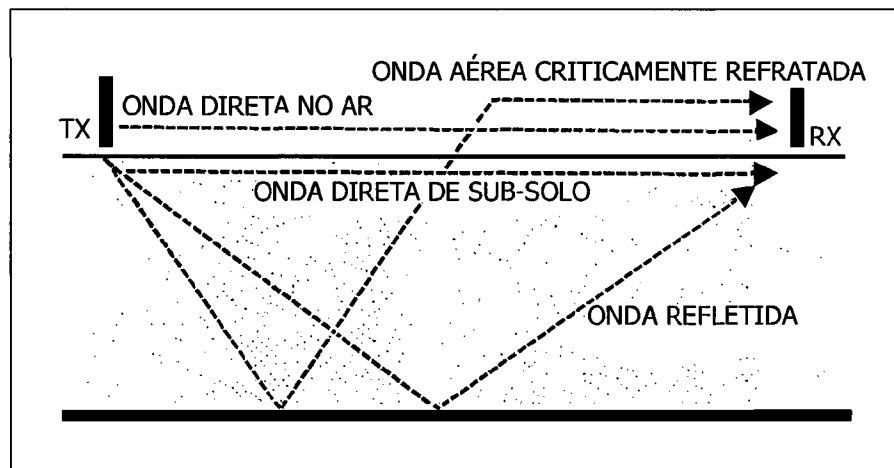


Figura 11 – formas de propagação das ondas GPR  
(modificado de Gögh *et al*, 1994)

Outras três maneiras de aquisição também podem ser utilizadas, como a (1) “aquisição em ponto médio comum”, mais conhecida como sondagem CMP (“*common midpoint*”), na qual cada sinal registrado é analisado na forma da variação do tempo percorrido com a separação de ambas as antenas, obtendo-se a velocidade do sinal numa zona central em sub-superfície; (2) “reflexões e refrações de grande ângulo”, comumente referida como sondagem WARR, diferenciando-se da CMP por uma de suas antenas permanecer fixa, sendo a outra afastada num intervalo fixo a cada medida. Nesta forma de aquisição são amostrados diversos pontos em sub-superfície, propiciando vantagem na sua utilização quando estão presentes estratos com mergulho em sub-superfície. O terceiro modo de aquisição chama-se (3) “trans-iluminação” ou “tomografia”, no qual a antena receptora mantém-se fixa de um lado de uma estrutura, enquanto a antena transmissora é deslocada no lado oposto; é comumente utilizado na investigação de estruturas de concreto, como vigas e pilares, bem como no interior de poços.

A resolução vertical de um levantamento Geo-Radar diz respeito à separação mínima detectável entre interfaces refletoras em profundidade. Estas interfaces ou camadas poderão ser detectadas se estiverem separadas no mínimo por um quarto do comprimento de onda dominante, no entanto, na prática, as camadas devem



possuir no mínimo um comprimento de onda de espessura para serem claramente observadas no registro do Geo-Radar. Quanto à resolução horizontal, ou seja, a separação lateral mínima que permita que mais de um objeto ou limite interfacial possa ser detectado, dependerá basicamente do padrão de radiação e separação da antena, assim como do comprimento de onda utilizado, razão de amostragem horizontal (ou espaçamento entre leituras) e profundidade do alvo investigado.

Como os registros obtidos em campo contêm reflexões, ruído coerente, ruído ambiente aleatório e algumas vezes, ruído instrumental, torna-se importante separar no processamento dos dados as reflexões verdadeiras, provenientes das interfaces geológicas ou objetos de interesse, dos vários tipos de ruídos prejudiciais, como acima descrito. Segundo Strieder (2000), nesta etapa do trabalho, diversos são os passos a serem realizados, dentre eles o (1) “ajuste do tempo zero”, de maneira que, ao se executar a conversão de tempo em profundidade se possa determinar corretamente a localização da superfície do terreno; (2) “remoção de baixas frequências”, correspondente à filtragem temporal de componentes ruidosos de muito baixa frequência, provenientes da saturação da parte eletrônica do instrumento gravador pela grande amplitude da onda do ar e direta e de fenômenos indutivos, e (3) “filtragem e remoção de *background*”, operação na qual são removidos os sinais não desejados, permitindo que somente as reflexões realmente significativas sejam visualizadas.

A visualização final dos sinais armazenados pode ser realizada de três diferentes maneiras, sendo a escolha definida por aquela que melhor representar a estrutura identificada. Num primeiro, a intensidade é plotada como uma série de curvas sinuosas; num segundo tipo, as áreas positivas de cada curva (chamadas de *wiggle*) são preenchidas, produzindo uma exibição de área variável (VAR) em duas dimensões; por fim, no terceiro modo de visualização, chamado de “exibição de densidade variável”, cada traço é representado por uma linha de *pixels* em tons de cinza ou coloridos, representativos das amplitudes em cada tempo.

### **3. Características do subsolo e fundamentos hidrogeológicos**

Considerando que os ensaios geofísicos propostos envolvem as camadas não-saturada e saturada do sub-solo, as considerações descritas neste capítulo visam prover um pequeno detalhamento das feições, características e condicionantes geradas pelo meio.

#### **3.1. Formação e estrutura da zona aerada**

Após a ocorrência de um vazamento acidental de derivados de petróleo, os mesmos se infiltrarão no solo verticalmente através da ação da gravidade, percorrendo a zona não saturada - também chamada de zona aerada - até atingirem a zona freática. Torna-se portanto importante um conhecimento profundo desta região, já que a mesma caracteriza-se como sendo um reservatório potencial de captura, armazenamento e novamente fonte de perda e infiltração de contaminantes (figura 12).

Nesta área, a água estará sujeita à ação de diversas forças presentes. Dentre as principais, destacam-se além da *força da gravidade*, o *potencial osmótico*, gerador da redução da velocidade da água, através da atração de suas moléculas pelos íons solutos, sendo portanto resultado direto dos constituintes dissolvidos na água subterrânea; bem como do *potencial de matriz*, proveniente da adsorção da água pela superfície dos sólidos e forças capilares nos poros do solo, gerando a atração da água pelos sólidos em sub-superfície (Boulding, 1995).

A zona aerada ou não saturada divide-se em três sub-regiões principais: (1) zona de raízes, partindo da superfície do solo até a máxima profundidade alcançada pelas raízes, caracterizando-se por grandes flutuações da qualidade e quantidade de umidade, em resposta à transpiração vegetal e evaporação; (2) zona aerada intermediária, na qual ainda permanece um conteúdo residual de umidade,

determinado pelo potencial de matriz (esta força potencial faz com que a quantidade de água retida nos poros do solo seja maior em solos argilosos do que em solos arenosos ou de cascalho) e (3) franja capilar, marcando o final da transição entre a camada não saturada e saturada. Esta força capilar ocorre em especial devido à atração dos sólidos pela água e pela tensão superficial da água, permitindo que o nível da água varie de 30 cm a 1 metro ou mais, dependendo da textura do solo e dos materiais geológicos presentes.

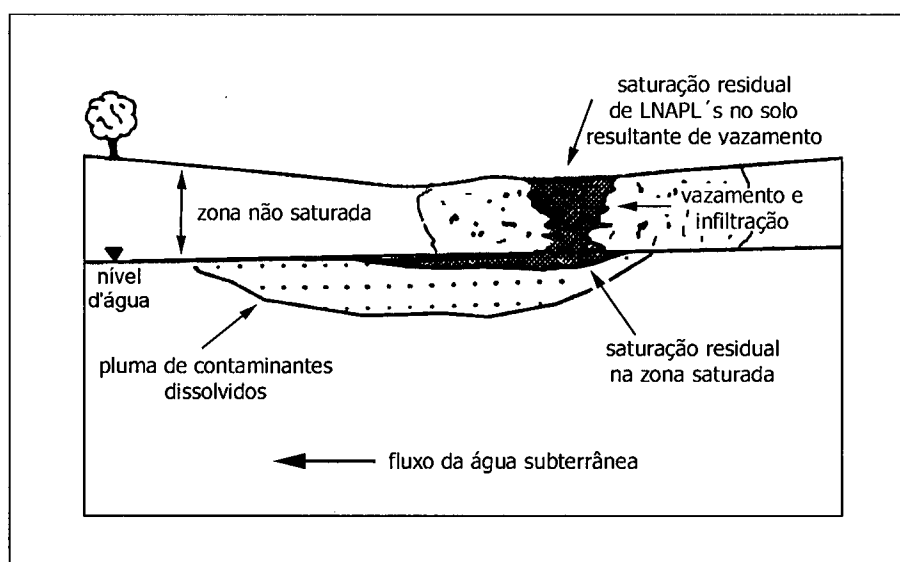


Figura 12 – exemplo da migração de hidrocarbonetos menos densos do que a água

O entendimento portanto do comportamento dos contaminantes na zona aerada, facilitará a compreensão dos resultados provenientes dos levantamentos geofísicos, já que variações na composição, textura e estrutura do solo, além das variações no seu teor de umidade e oscilações do nível d'água freático alterarão as respostas elétricas e eletromagnéticas locais. Concomitantemente, esta categoria de levantamentos, quando sob situações de contaminação, é realizada enfocando principalmente a camada aerada e parte do aquífero freático, devido às dificuldades de abertura dos eletrodos do arranjo, portanto inviabilizando grandes profundidades de investigação, além da dificuldade de se obter grandes profundidades de imageamento com o Geo-Radar, sem afetar a qualidade da resposta.

### **3.2. A água subterrânea no contexto hidrológico**

Para melhor compreender a origem e destino das águas subterrâneas, torna-se importante conhecer o ciclo hidrológico como um todo. Este ciclo, como o nome já retrata, envolve as etapas pelas quais a água percorre em seus diversos estados físicos, estimulada principalmente pela energia solar. Esta energia faz com que a água através da evapotranspiração direta das águas dos rios e oceanos, do solo ou da evapotranspiração das plantas (resultante da respiração e transpiração), retorne para a atmosfera, seja transportada pelo vento e sob condições ideais, precipite-se sobre os continentes.

Após a ocorrência da precipitação, numa ação chamada de deflúvio, a água move-se pela gravidade, seguindo a declividade do terreno até atingir os rios e oceanos. Parte da água - conforme o grau de porosidade do solo e por consequência maior permeabilidade (capacidade de infiltração) - infiltra-se e se move através das zonas aeradas (não saturadas) para as zonas saturadas, onde passa a compor o lençol de água subterrâneo. Este corpo d'água em algum momento atingirá o nível de base de um rio (menor nível de um rio perene, quando este encontra-se em seu período de estiagem), alimentando-o.

O inverso também poderá ocorrer, ou seja, a água presente nos rios, lagos e barragens alimentar a água subterrânea. Isto ocorrerá caso o nível hidráulico da água superficial encontre-se num nível maior do que da água subterrânea.

Segundo Boulding (1995), a água subterrânea é a etapa mais difícil de se analisar dentro do Ciclo Hidrológico, já que se encontra “escondida” da visão, e ocorre num ambiente complexo de solos e materiais geológicos.

### **3.3. *Aqüíferos: classificação e aspectos relevantes***

O subsolo de cada região é decorrente de um passado geológico e intempérico, formador de determinados tipos de rochas, sua conseqüente desagregação e por conseqüência, formação de novas categorias de rochas, bem como de distintas classes de solos. Nestes diversos ambientes geológicos é que estão inseridos os principais tipos de aqüíferos existentes.

Segundo Manoel Filho (2000), “*aqüífero* é uma formação geológica que contém água e permite que quantidades significativas dessa água se movimente no seu interior em condições naturais”. Estes podem ser classificados segundo a pressão em seus limites superior e inferior, além da capacidade de transmissão de água através de suas camadas limítrofes.

*Aqüíferos confinados* são aqueles em que a pressão no topo é maior do que a pressão atmosférica, dividindo-se em *confinado não drenante* e *confinado drenante*; o primeiro quando suas camadas limítrofes são impermeáveis, e o segundo quando pelo menos uma de suas camadas limítrofes é semi-permeável, permitindo a entrada ou saída de fluxos pela sua porção superior ou inferior.

*Aqüíferos livres*, também conhecidos como *aqüíferos freáticos*, são aqueles com limite superior ocupado por uma superfície freática, onde todos os pontos encontram-se à pressão atmosférica, podendo também ser subdivididos em *drenantes*, quando possuem uma base ou limite inferior semipermeável, e *não drenantes*, quando sua base é impermeável.

Os *aqüíferos freáticos* são de extrema importância nos casos de contaminação por hidrocarbonetos de petróleo, já que serão os primeiros a serem afetados pela infiltração direta destes produtos. Quando da detecção de um vazamento acidental, normalmente o produto já percorreu a camada não-saturada do solo, atingindo o nível freático, onde se espalha horizontalmente sobre a água num primeiro momento, já que esta categoria de contaminantes possui densidade menor do que a água. Reforçando ainda a importância desta classe de aqüífero, são eles os responsáveis pela recarga dos aqüíferos confinados, situados abaixo, caracterizados como de descontaminação mais difícil e onerosa.

### **3.4. Conceitos hidrogeológicos de escoamento em meios porosos**

Uma breve abordagem de conceitos hidrogeológicos numa dissertação baseada principalmente em técnicas geofísicas de detecção valida-se partindo da premissa de que as respostas geofísicas locais, bem como o monitoramento das variações temporais relacionadas ao sub-solo e contaminantes presentes, estarão diretamente correlacionadas ao comportamento da água em sub-superfície, já que ela poderá agir como transportadora dos contaminantes dissolvidos, ou descrever os caminhos preferenciais a serem percorridos pelos contaminantes.

Deve-se considerar que o meio poroso é constituído por partes fluídas e sólidas. A parte sólida é composta por partículas ou aglomerados de partículas, onde em seus interstícios encontram-se porções de água e ar, compreendendo as fases líquida e gasosa. Seus movimentos dependem basicamente das propriedades do fluido e das características do meio, através das leis físicas que regem o movimento da água, objeto da *hidrodinâmica dos meios porosos*.

#### **3.4.1 Lei de Darcy**

Em 1856, o engenheiro hidráulico Henry Darcy, partindo da premissa de que a água não é estática, mas encontra-se em constante movimento, fluindo através de poros interconectados, desenvolveu um experimento onde pesquisava o escoamento da água num filtro de areia, vindo a concluir que a vazão do escoamento (volume por unidade de tempo) era proporcional à seção transversal ( $A$ ) do filtro e à diferença de cargas hidráulicas ( $h_1$  e  $h_2$ ) entre dois piezômetros distintos, assim como inversamente proporcional à distância ( $L$ ) entre estes mesmos piezômetros.

A vazão com unidade em  $\text{m}^3/\text{s}$ , obtida através da fórmula de Darcy, pode então ser descrita como:

$$Q = kA \frac{h_1 - h_2}{L} \quad (23)$$

Na equação 24,  $k$  é o coeficiente de proporcionalidade, chamado de *condutividade hidráulica* (L/T).

Esta mesma equação pode ser simplificada representada por:

$$Q = kiA \quad (24)$$

Onde  $A$  é a área de fluxo e  $i$  o gradiente hidráulico.

### 3.4.2 Condutividade Hidráulica

Este fator, incluso na Lei de Darcy, representa a vazão na unidade de volume por tempo, levando em conta as características do meio, incluindo a porosidade, tamanho, forma, arranjo e distribuição das partículas, além das características do fluido que está escoando (Cabral, 2000). Reflete portanto a propriedade de um solo/rocha sendo percorrido pelo fluxo de água e/ou contaminante sob determinadas condições de pressão. De forma mais direta, esta propriedade descreve a maior ou menor facilidade da passagem de um fluido (normalmente relacionado à água) pelos seus vazios.

Ela dependerá da parcela utilizável de vazios (porosidade) - independente de tratar-se de um solo poroso (arenítico, saibroso, etc.) ou uma rocha com muitos vazios - e da resistência (atrito) da rocha porosa à passagem da água, dependendo de suas características, como densidade, viscosidade e temperatura. Portanto,

quanto menor o coeficiente de permeabilidade, menor será o fluxo de água que escoar pelos poros (Schianetz, 1999).

Apesar da condutividade hidráulica poder ser determinada por fórmulas empíricas e ensaios de laboratório, comumente utilizam-se ensaios de bombeamento para a obtenção de seus valores. Existem diversos sistemas de ensaios de bombeamento, no entanto alguns se prestam mais à exploração de água e outros à avaliação da vazão em locais contaminados, pois são de rápida realização em campo, gerando pequeno ou nenhum volume de água contaminada a ser corretamente destinada. Dentre eles destaca-se o *slug test*, no qual coloca-se um volume de água num piezômetro, monitorando-se o rebaixamento do nível d'água até que este atinja o nível estático.

Na interpretação deste tipo de ensaio, utiliza-se o chamado “Método de Hvorslev”, que consiste na construção de um gráfico *log* do tempo (minutos ou segundos) *versus* rebaixamento. Após realizado o gráfico, toma-se o tempo registrado quando da recuperação do nível d'água em 37%, inserindo-o na fórmula:

$$k = r^2 \ln(L / R) / (2LT_0) \quad (25)$$

Nesta equação,  $r$  é o raio do tubo do piezômetro;  $L$  é a espessura da zona de perfuração;  $R$  o raio da zona de perfuração e  $T_0$  é o tempo necessário para 0,37 de recuperação (Sprucek, 2002).

Na temática da presente dissertação, o conhecimento da condutividade hidráulica é de grande relevância, pois com a velocidade do fluxo do aquífero, é possível determinar a provável velocidade de propagação das partículas poluentes dissolvidas, desde que também se considere o poder de adsorção e retardamento dos contaminantes.



### 3.4.3 Transmissividade

Esta característica corresponde à quantidade de água e por consequência, de contaminantes que pode ser transmitida horizontalmente por toda a espessura saturada do aquífero. A mesma pode ser conceituada como sendo a taxa de escoamento de água através de uma faixa vertical do aquífero com largura unitária submetida a um gradiente hidráulico unitário. Em outras palavras,  $T$  é a quantidade de água e/ou água com contaminantes que pode mover-se na formação geológica, sendo obtida através da equação:

$$T = k.b \quad (26)$$

Onde  $k$  é a condutividade hidráulica, obtida através de ensaios de bombeamento e já discutida anteriormente, e  $b$  a espessura do aquífero.

Para aquíferos freáticos, como no presente estudo, a espessura varia com o tempo, de acordo com a recarga ou descarga. As unidades comuns de transmissividade são  $m^2/s$  ou  $m^2/dia$ .

### 3.4.4 Velocidade da água subterrânea

A determinação deste fator também é relevante para áreas contaminadas, pois através dele pode-se determinar o tempo necessário para uma pluma de contaminação atingir “diretamente” um provável receptor ou um grupo de receptores, como uma residência, escola ou hospital; ou “indiretamente”, quando a pluma interceptar poços de abastecimento, áreas de plantio de hortaliças e vegetais, ou corpos d’água utilizados para desedentação de animais, dentre outros.

A Velocidade de Darcy, também chamada de velocidade aparente, pode ser definida como a vazão ( $Q$ ) por unidade de área ( $A$ ). Entretanto, devido à área da seção transversal de escoamento pelos poros ser bem menor do que a área da seção total do aquífero, ela não representa a velocidade real do fluxo, fundamento importante no cálculo do transporte advectivo de poluentes.

Esta área correta e que considera somente os vazios, pode ser obtida multiplicando-se a porosidade efetiva para fluxo ( $n_e$ ) pela área total ( $A$ ). Portanto a velocidade linear média ( $v$ ), ou seja, a velocidade verdadeira de escoamento pelos poros pode ser obtida através da equação:

$$v = \frac{Q}{n_e A} \quad (27)$$

Com base nos tópicos expostos anteriormente, fica claro que as operações de levantamento geofísico em áreas afetadas por vazamentos de hidrocarbonetos requerem uma avaliação conjunta das diversas variáveis geradas pelo meio e pela água subterrânea, de maneira a se dispor de um modelo situacional o mais completo possível.

#### **4. Contaminação de solo / águas subterrâneas por hidrocarbonetos**

##### **4.1. *Cenário atual e política nacional***

A grande maioria das contaminações acidentais ou não, por derivados de petróleo, ocorre em locais de armazenamento de combustíveis (Cetesb, 2002<sub>a</sub>), sejam eles postos de revenda ou postos de abastecimento privados, envolvendo a ruptura de linhas de transmissão, perda da estanqueidade dos reservatórios ou

descarte clandestino de óleos inservíveis e borras de graxa, provenientes dos sistemas de troca de óleo e dos serviços de lavagem e desengraxe.

Somente com relação aos postos de revenda, existem atualmente no Brasil 29.111 unidades em operação, de acordo com a ANP – Agência Nacional do Petróleo. Se considerarmos os sistemas de armazenamento de combustíveis privados, este número poderá ser até 50%\* maior, já que não existe esta estatística atualmente. Segundo dados da Cetesb – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (2002<sub>a</sub>), vinculada à Secretaria de Meio Ambiente do Estado de São Paulo, no período de 1984 a 2001, somente no Estado de São Paulo\*\* foram realizados 500 atendimentos emergenciais em situações de vazamento de produto com conseqüente risco ambiental e social, sem considerar as situações não comunicadas.

Embora tenhamos no Brasil um sistema de abastecimento público de água proveniente em sua maior parte de fontes superficiais, como barragens, rios e lagos, somente recentemente a comunidade civil e autoridades públicas visualizaram a importância que o tema requer. Este fato estimulou a criação da Resolução Conama nº 273 de 17/01/2001 que obriga todos os estabelecimentos de revenda e armazenagem a efetuarem o respectivo licenciamento ambiental em todas as suas fases, além de ditar normas de instalação e operação.

A realização de normas e legislações específicas para situações em que a contaminação já ocorreu começam a surgir. Apesar do tema ser profundamente investigado em países como a Alemanha, Holanda e Estados Unidos em especial, onde desde a década de oitenta existem programas de eliminação das fontes poluidoras e remediação das áreas contaminadas, somente agora e de forma pioneira a Cetesb lançou a publicação intitulada “Estabelecimento de Valores Orientadores para Solos e Águas Subterrâneas”.

\*valor inferido

\*\*esta estatística existe somente para o estado de São Paulo, sendo o único estado a dispor de uma equipe governamental de atendimento emergencial, especializada em caso de vazamentos de contaminantes.

Trata-se de valores de referência dos padrões de potabilidade da água subterrânea para diversas classes de contaminantes com base em seu poder carcinogênico. Tal padronização se faz necessária, em vista de que as atuais normas existentes, como a Resolução nº 20/86 do Conama, de caráter ambiental, enfocam principalmente os cursos d'água superficiais, assim como a Portaria nº 36/90 do Ministério da Saúde, que determina padrões de potabilidade da água como um todo, sem considerar o local de onde é proveniente e o uso que se faz da área. Neste sentido, diversos estados já estão elaborando suas legislações e políticas de controle e qualidade das águas subterrâneas.

#### **4.2. Possíveis fases presentes**

Segundo EPA (1996), os vazamentos de hidrocarbonetos podem ser detectados sob até quatro distintas fases: (1) fase vapor, ocorrendo primariamente na zona insaturada; (2) fase residual, quando as frações de contaminantes encontram-se adsorvidas nas partículas de solo e em meio aos poros do solo, podendo ocorrer acima ou abaixo da camada de água subterrânea; (3) fase aquosa, quando se encontram dissolvidos na água subterrânea e solos úmidos, e (4) fase líquida, caracterizada pela presença de produto livre, mantido pela flutuação na água subterrânea e franja capilar ou em repouso sobre lentes de baixa permeabilidade na zona insaturada (figura 13).

Quando sob a forma de fase vapor, os hidrocarbonetos em altas concentrações podem ocasionar sérios riscos de explosão ou à saúde humana, pois possuem facilidade em migrar para a superfície por diferença de pressão, infiltrando-se em garagens, residências, construções e galerias subterrâneas, como de água, esgoto, telefone e luz. Esta fase é encontrada misturada em meio ao ar e vapor d'água na zona insaturada.

A fase residual geralmente não se estende a grandes distâncias a partir do foco de vazamento, com tendência a ser relativamente móvel. Esta forma de

hidrocarbonetos pode persistir no ambiente, lixiviando-se em compostos mais solúveis, contaminando a água subterrânea por um longo período de tempo. Devido às variações do nível d'água, fases residuais podem ocorrer acima e abaixo do nível d'água, imobilizando significantes quantidades de produtos anteriormente presentes na fase livre. Sob esta forma podem ocupar mais de 50% do total de espaços vazios nos sedimentos em que se encontram.

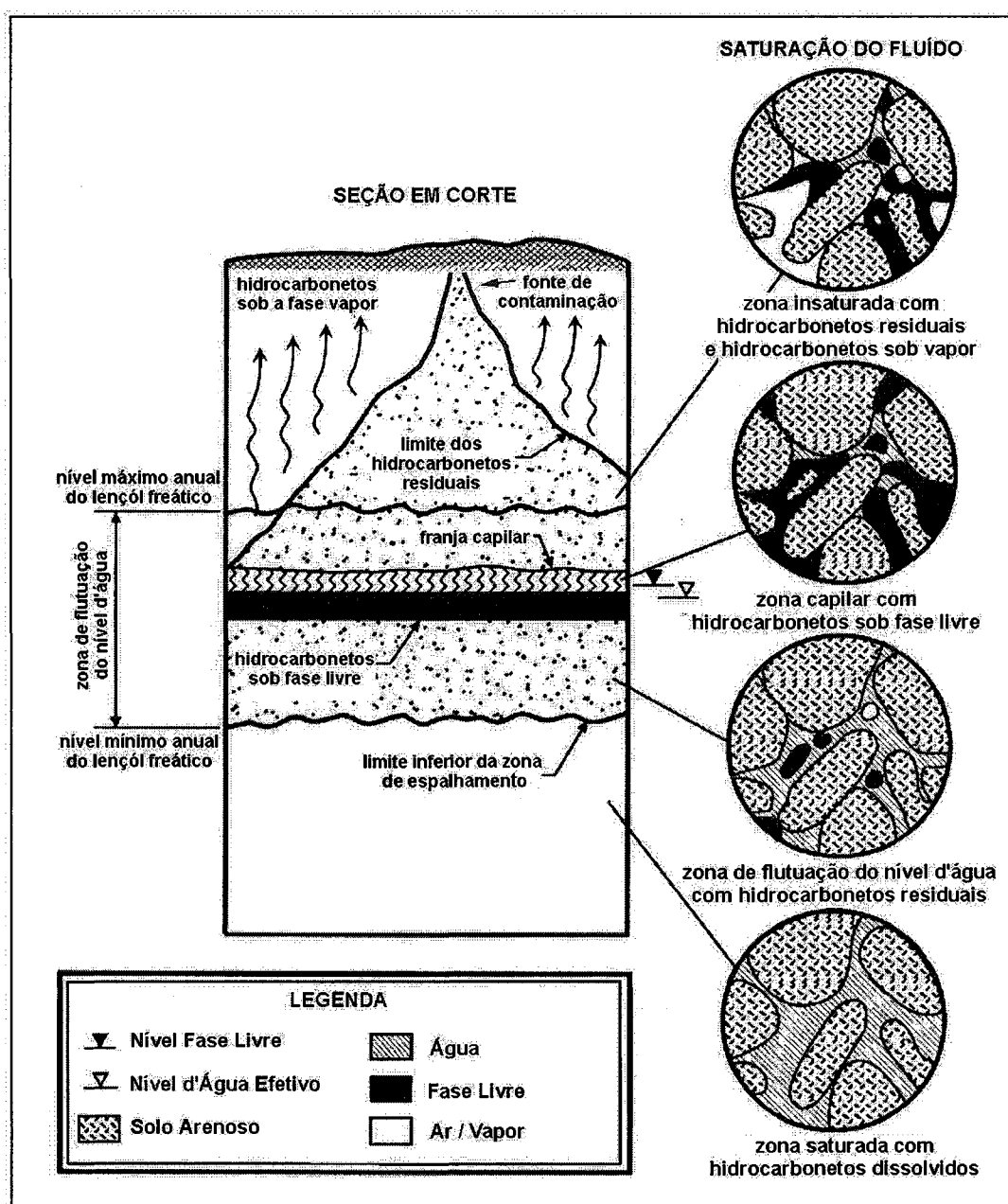


Figura 13 – possíveis fases presentes de hidrocarbonetos (EPA, 1996)

A fase aquosa ou dissolvida é encontrada em solos úmidos acima da franja capilar, na água presente na franja capilar e abaixo da água subterrânea. Apesar dos hidrocarbonetos dissolvidos serem uma pequena percentagem da massa total de hidrocarbonetos presentes, eles representam o maior volume de contaminação, estendendo-se sobre extensas áreas, além de constituírem o meio mais provável para a exposição humana e ambiental.

Hidrocarbonetos em fase líquida ou fase livre caracterizam-se por possuírem facilidade de saturação dos vazios presentes no meio geológico, acumulando-se sobre o lençol d'água subterrâneo, podendo chegar a promover o rebaixamento do nível d'água pelo peso da fase livre sobreposta.

As fases livre e residual são normalmente referidas como uma fase simples de produtos menos densos do que a água (LNAPL), e que pode contribuir para a formação da fase vapor, a partir de sua evaporação e para a fase aquosa através da dissolução. São estas as fases melhor detectadas em levantamentos geofísicos, em especial a fase livre, já que a resposta tanto de eletrorresistividade como do sinal do Geo-Radar será função direta da saturação e da espessura da lâmina de produto livre. Os levantamentos geofísicos que enfocam a detecção da fase dissolvida, relatam a necessidade de um alto teor de sólidos dissolvidos para a eficácia da resposta (EPA, 1997).

#### ***4.3. Transporte em sub-superfície***

Segundo Sracek (2000), os hidrocarbonetos que percolam o subsolo, movimentam-se por diversos processos físicos e químicos. Dentre eles destaca-se como principal a “advecção”, agindo pelo gradiente hidráulico e através do fluxo d'água, portanto devido à diferença de cotas entre o ponto com maior elevação do aquífero para o de menor elevação, podendo ser responsável por até 50% das isolinhas de concentração inicial. A “difusão” ocorre pelo gradiente de concentração, ou seja, do ponto de maior concentração para o ponto de menor concentração. Em

casos onde não existe gradiente hidráulico e portanto não existem processos advectivos (águas estagnadas) a difusão é o principal fator de transporte de contaminantes, sendo maior em águas livres do que em ambientes porosos.

A “dispersão” é o espalhamento de um contaminante em três dimensões causada pelas variações de permeabilidade. Este fenômeno de transporte pode ser chamado também de velocidade advectiva, pois depende dos fenômenos de advecção (dependentes de fluxo), podendo ocorrer em escala microscópica, quando através dos poros da rocha e/ou solo; escala mesoscópica através de pequenos estratos e em escala macroscópica em áreas de permeabilidade baixa.

A “adsorção” refere-se ao processo de adesão de um contaminante na superfície dos sólidos (o processo inverso chama-se desorção). Sua principal característica é a de retardar a velocidade de transporte de um contaminante em relação ao fluxo d’água.

Segundo Dehaini (2001), deve-se considerar que após liberados para o ambiente e durante os processos de transporte, a composição relativa dos hidrocarbonetos deve mudar drasticamente, principalmente devido à volatilização, dissolução, degradação biológica (discutida no capítulo 5.5) e degradação química. Cada processo em particular influencia em maior ou menor grau os constituintes ou grupos de constituintes presentes, sendo as taxas de transformação função direta das condições ambientais presentes.

#### **4.4. Condições de detectabilidade pelos métodos geofísicos utilizados**

##### **4.4.1 Técnicas de Eletrorresistividade**

Como já frisado anteriormente, os métodos geofísicos podem determinar sob determinadas condições a presença e extensão da pluma de contaminantes presentes no subsolo. Permitem também estimar as condições hidrogeológicas predominantes, como estrutura da pluma, parâmetros de filtração e migração, direção e velocidade de fluxo, dependendo basicamente das razões entre as resistividades, espessuras e profundidades dos meios analisados, bem como do contraste entre os fluídos nativo e invasor (Lima & Porsani, 1994). Neste sentido, os métodos de eletrorresistividade e Geo-Radar são atualmente os métodos cientificamente mais documentados (EPA, 1997) e que tem sido extensivamente mais utilizados (Marin *et al* , 1998).

Segundo EPA (1987, 1989), a utilização da eletrorresistividade para a detecção direta de contaminantes orgânicos aparece como uma técnica que tem que ser utilizada com cuidado, sob certas condições. A variação natural na resistividade do meio pode mascarar uma anomalia de resistividade gerada pela presença de hidrocarbonetos. No entanto, as técnicas de eletrorresistividade e Geo-Radar são capazes individualmente de detectar de forma direta a presença de contaminantes através da medição das variações de condutividade no solo causadas pelos compostos químicos, além de poderem operar em áreas com alto ruído de fundo e heterogeneidades presentes no solo (Wood & Palmer, 2000).

Com base em estudos realizados, a eletrorresistividade pode ser utilizada em mapeamentos preliminares dos contaminantes (EPA, 1993) e seu uso dependerá do conhecimento do meio local e do tempo decorrido após o vazamento. Às vezes, plumas mais antigas e que ainda não se alteraram eletricamente pela biodegradação (tratado no capítulo 4.5), são mais fáceis de serem detectadas, devido às flutuações sazonais do nível d'água freático, que acaba por transportar os contaminantes acima e abaixo desta zona, mantendo-os retidos sob a fase residual numa grande



extensão de área, gerando um efeito de “espalhamento” da pluma e respectiva contaminação da área da ocorrência e sua vizinhança. Segundo o autor, a utilização de técnicas mais modernas, como a tomografia elétrica, com grande capacidade de resolução horizontal e vertical na detecção de plumas, ou outras técnicas que já vem sendo utilizadas com sucesso e de maneira comprovada, como o Geo-Radar, (quando o meio o permitir) proporcionam resultados mais seguros.

Com relação à detectabilidade de plumas de contaminação de hidrocarbonetos pelas técnicas de eletrorresistividade, Mazác *et al* (1990) evidenciam três diferentes categorias do meio com relação às condições hidrogeológicas e grau de contaminação, assim diferenciadas: categoria “A” – zona de aeração parcialmente saturada com água, onde a contaminação dificilmente poderá ser detectada; categoria “B” – aquífero completamente saturado (abaixo do nível freático), local portanto onde os contaminantes menos densos que a água estarão flutuando sobre o nível d’água, assim como parcialmente dissolvidos na mesma, que é a situação mais favorável para ser detectada pela geofísica, e categoria “C” – rochas impermeáveis ou menos permeáveis abaixo do aquífero.

Uma condição necessária para a detecção da contaminação é a existência de uma razão relativamente alta entre a resistividade do aquífero contaminado ( $\rho_C$ ) com relação à resistividade da matriz de rocha ( $\rho_A$ ) ou meio hospedeiro do aquífero ( $\rho_C/\rho_A$ ). Secundariamente, a detecção depende também de outros fatores como a porosidade efetiva e resistividade da água de saturação, já que em aquíferos contaminados, a resposta de resistividade depende diretamente da resistividade do contaminante. Segundo Osella *et al* (2002), a utilização do método de resistividade é útil em estudos de contaminação de solos quando o agente contaminante é condutor, ou quando um contaminante é resistente, como os hidrocarbonetos e está localizado numa zona de baixa resistividade.

Respostas altas de resistividade nem sempre são devidas a plumas de contaminação, podendo ser geradas pela camada aerada do solo disposta logo acima do nível d’água, sendo muitas vezes erroneamente interpretadas como tal.

Para uma identificação segura de uma camada oleosa disposta sobre o nível d’água, é imprescindível que esta seja razoavelmente contínua em relação à

espessura da zona aerada do solo e secundariamente possua uma espessura considerável, não podendo portanto ser concluída a ausência de contaminação pela inexistência de respostas elétricas no local.

Devido à necessidade das camadas tornarem-se progressivamente mais espessas para poderem ser resolvidas por medições remotas em superfície à medida que se aumenta a profundidade, Merrick (1997) relata que para uma camada poder ser detectada pelos métodos de eletrorresistividade ela deve possuir além do contraste de resistividade, uma espessura relativa (*ER*) de ao menos 0,1 obtida a partir da fórmula a seguir:

$$ER = \frac{\textit{espessura}}{\textit{profundidade}} \quad (28)$$

Considerando que a profundidade citada é a do topo da camada, uma pluma localizada a cinco metros de profundidade necessitaria de uma espessura mínima de cinquenta centímetros para ser visualizada, no entanto, se o contraste de resistividade for forte, a camada pode ter detectabilidade melhor do que a prevista por esta fórmula.

Segundo EPA (1997), ainda é necessário para a detecção da contaminação que o nível da água subterrânea esteja a menos do que cinco metros de profundidade, além da existência compulsória de solos condutivos na zona contaminada e da presença de uma camada sobrenadante de produtos vazados sobre a superfície da água subterrânea. De acordo com Buselli *et al* (1992), a variação sazonal também influencia diretamente os resultados geofísicos, já que períodos secos auxiliam no aumento dos valores de resistividade detectados, assim como também é verídico o inverso, ou seja, períodos chuvosos correlacionam-se a resistividades mais baixas, com variações que podem variar de até 15% a 25%.

Com relação à utilização em particular da técnica de “SEV” (sondagem elétrica vertical) na detecção de plumas de contaminação geradas por hidrocarbonetos menos densos que a água (LNAPL's), a mesma é considerada

relativamente limitada quando a camada impactada pelos contaminantes está descontínua, ou quando a espessura desta camada é muito pequena com relação a todo o pacote litológico observado.

Como já anteriormente frisado, esta técnica se presta com grande qualidade como ferramenta de monitoramento, devido à sua maior confiabilidade na detecção de mudanças nos campos geoeletricos, ao invés da obtenção de medidas absolutas (Mazác *et. al*, 1990).

No que diz respeito às técnicas de eletrorresistividade, como o “imageamento geoeletrico 2D”, estudos realizados por EPA (2000) confirmaram sua eficácia utilizando o arranjo dipolo-dipolo no mapeamento de uma antiga pluma de contaminação gerada por hidrocarbonetos, chegando até mesmo a separar áreas com e sem atividade bacteriológica.

Quanto à técnica de “imageamento elétrico 3D”, também chamada de “tomografia elétrica” (em inglês ERT – *electrical resistance tomography*), estudos realizados por Ramirez *et al* (1995), demonstraram que a tomografia ERT é eficiente em combinação com outros dados no monitoramento e controle do progresso da remediação de contaminantes em sub-superfície, já que os dados são precisos e modernos equipamentos geofísicos atualmente disponíveis comercialmente, são capazes de rapidamente realizar tais levantamentos.

#### **4.4.2 Geo-Radar - GPR**

O Geo-Radar (GPR) utiliza-se da propagação da energia eletromagnética, sensibilizando-se quanto à variação da condutividade elétrica e da permissividade dielétrica complexa, em especial quando estão presentes contaminantes orgânicos (Santamarina & Fam, 1997). Detecções diretas em casos de contaminações recentes por hidrocarbonetos são causadas pelo deslocamento da água subterrânea - com permissividade dielétrica de 80 - pelo hidrocarboneto, de natureza resistente e

permissividade dielétrica 2 (Carcione *et al*, 2000), gerando por consequência um contraste e respectivo aumento local na resistividade nos locais onde se acumulam (Whiteley & Jewwell, 1992). Esta baixa ou quase nula capacidade de polarização dos compostos orgânicos e por consequência, pequena capacidade em transmitir as correntes elétricas, foi comprovada em laboratório, através da utilização de diversas frequências na faixa de Mhz-Ghz (Santamarina & Fam, 1997).

Carcione *et al* (2000), em estudos de detectabilidade de hidrocarbonetos utilizando o Geo-Radar em levantamentos 2D, neste caso em especial, sobre um vazamento de gasolina de aviação, concluíram que a localização de uma camada contaminada pode ser realizada com antenas de 200 Mhz, desde que a concentração seja relativamente alta. Por outro lado, verificaram que antenas de menor frequência, como a de 50 Mhz, podem ser utilizadas para o mapeamento da extensão da área poluída.

De forma mais precisa, Barber & Morey (1994), em estudos de detecção pelo Geo-Radar de finas camadas de contaminação por hidrocarbonetos, concluíram que para antenas de 100 Mhz, é requerida uma espessura de camada impactada por hidrocarbonetos de 10 a 90 cm, para que sejam notadas distintas reflexões provenientes de seus limites superiores e inferiores. Para outras frequências, reflexões distintas são observadas com camadas de espessura de 2 a 18 cm para antenas de 500 Mhz e de 1 a 8 cm para antenas de 900 Mhz.

Apesar do Geo-Radar não ser capaz de evidenciar diretamente as mudanças causadas pelos compostos orgânicos dissolvidos em água, ele possibilita inferir a sua presença através de mudanças causadas por estes compostos, estejam eles acima ou abaixo do nível d'água (EPA, 1987). O preenchimento da camada aerada por gases provenientes da volatilização dos contaminantes orgânicos também propicia a sua detecção, portanto contaminantes com alta pressão de vapor como o diesel, podem ser inicialmente mais facilmente detectados. O contrário também é válido, como no caso das plumas antigas, capazes apenas de uma insipiente ou quase nula geração de vapores orgânicos (VOC's).

Uma das limitações básicas do GPR verifica-se quando o meio a ser investigado é predominantemente composto por argilas, em especial quando em

camadas de espessura maior do que um metro e muito próximas à superfície, o que pode inviabilizar o levantamento (EPA, 1993). Segundo Santamarina & Fam (1997), sistemas com argila-água-NAPL (NAPL mais ou menos densos do que a água) são considerados complexos, tornando a permissividade desta mistura de três fases sensível diretamente a sua distribuição espacial, fazendo com que seja difícil a resolução de parâmetros na área investigada com apenas um levantamento. Contudo, reportam ser facilmente distinguível o efeito de mudanças temporais.

A eficácia do GPR no mapeamento desta natureza de contaminantes ainda é motivo de pesquisas. Existem contradições quanto à forma observada da reflexão, a qual pode aparecer como um “halo” sem sinais em que as ondas encontram-se atenuadas, estendendo-se por todo o registro dos levantamentos (Barber & Morey, 1994; Daniels *et al*, 1995; Grumman & Daniels, 1995), também chamado de “zona de sombra” (Sauck, 1997); ou sob a forma de anomalias condutoras (Campbell, 1996 *apud* EPA, 1997), provavelmente devido à geração de um ambiente condutor pela ação de biodegradação bacteriológica.

Segundo Grumman & Daniels (1995), estas áreas de sombra tem sido correlacionadas com a observação de plumas de contaminantes orgânicos de alta volatilidade. Segundo os autores, a utilização da técnica 3D é particularmente boa para a representação espacial destas regiões onde os sinais são atenuados, o que também foi confirmado por Daniels *et al* (1997), segundo os quais, a visualização em três dimensões é a que melhor retrata feições planares e semiplanares, como as geradas por contaminantes orgânicos menos densos do que a água. Tal fato foi comprovado através da realização pelos autores de levantamento 3D sobre um vazamento de diesel numa antiga refinaria abandonada, onde um levantamento 2D gerou a interpretação errônea de uma anomalia gerada pela contaminação como mudanças nas propriedades naturais do solo.

Por último, a tabela 2 (EPA, 1997) mostra uma síntese comparativa entre os métodos de Resistividade Elétrica e GPR, na detecção de produtos derivados de petróleo sob as fases livre e residual.

Tabela 2 – sumário dos métodos geofísicos na delineação de produtos sob as fases livre e residual (modificado de EPA, 1997)

	<b>GPR</b> <b>GROUND PENETRATING RADAR</b>	<b>RESISTIVIDADE</b> <b>ELÉTRICA</b>
PROFUNDIDADE DE DETECÇÃO	1 a 5 metros	3 a 5 metros
INTERFERÊNCIAS EXTERNAS	concreto, estruturas com superfície metálica	concreto, estruturas com superfície metálica
INTERFERÊNCIAS NATURAIS	solos condutivos (argilas), variações geológicas laterais	solos muito condutivos (argilas compactas e úmidas), variações geológicas naturais
LIMITE DE DETECÇÃO	desconhecido	desconhecido
CUSTO	baixo a moderado	moderado a alto

#### ***4.5.A biodegradação como fator de alteração das características elétricas dos contaminantes***

Diversos estudos têm detectado anomalias de alta condutividade, em levantamentos realizados sobre áreas impactadas por antigos derrames de hidrocarbonetos. De acordo com amostragens de água em poços de monitoramento, estas variações podem ser de até três a cinco vezes maiores do que os resultados de fundo, presentes nas áreas não impactadas (Sauck, 1997). Por outro lado, hidrocarbonetos são conhecidamente produtos apoiaves e resistivos, o que torna realmente interessante tal fenômeno.

Segundo Sauck (1997), uma pluma de contaminantes pode ocorrer em duas sub-áreas distintas; a primeira em sua porção localizada na camada insaturada, onde estará presente sob as fases livre e residual, com seus sedimentos impactados diretamente pelos hidrocarbonetos, e fase vapor, que é composta por voláteis, presentes tanto nos arredores quanto acima da fase livre. A segunda sub-área representa a fase dissolvida, situada abaixo do nível d'água, subdividida numa

porção aeróbica presente acima, abaixo e nos seus arredores, devido à entrada da água da chuva oxigenada, bem como do contato com a água subterrânea próxima, também rica em oxigênio; e outra porção anaeróbica, dentro da pluma em si, onde o oxigênio existente é rapidamente consumido, gerando um ambiente anóxico.

Também presente na camada insaturada e acima das zonas de degradação biológica, ocorre uma pluma de gases difusos, rica em dióxido de carbono e metano, ambos produtos resultantes dos processos de metabolismo bacteriológico.

Estas diversas plumas presentes na camada insaturada, além do conhecimento de que os produtos vazados não se encontram de forma contínua no sub-solo - demonstrando saturações que raramente ultrapassam 50%, permitindo um preenchimento por água e ar dos poros remanescentes - sugerem que os resultados de resistividade elétrica poderão ser afetados de diversas formas.

Os resultados dependem do volume do vazamento, superfície total afetada, composição dos produtos vazados, espessura da camada insaturada, mineralogia dos sedimentos, distribuição granular e regime de chuvas.

Após a ocorrência de um vazamento, inicialmente serão observados valores altos de resistividade, entretanto, dentro das plumas presentes no aquífero e na fase residual do produto, a biodegradação produzirá ácidos orgânicos com alto poder de lixiviação dos sais presentes no solo ou grãos de sedimento. Este processo é adicionalmente aumentado pela ação bacteriológica sobre o dióxido de carbono liberado após o consumo de oxigênio pelas bactérias presentes, o que também acarretará a geração de ácidos carbônicos no entorno da camada insaturada, resultando conseqüentemente na lixiviação dos sais inorgânicos desta região.

Segundo Sracek (2002), este processo bacteriológico, no qual poderão estar presentes mais de trezentos tipos distintos de organismos de degradação de hidrocarbonetos conhecidos, dentre fungos e bactérias, consumirá em seqüência os chamados “receptores de elétrons” ou seja: oxigênio, nitrato, manganês, ferro III e sulfato presente na água. Isto resultará num processo de metanogênese responsável por uma alta concentração de ferro dissolvido (ferro II), além da geração de uma grande concentração de carbono dissolvido, água, energia para os microorganismos, calor e ácidos orgânico e carbônico. Estes últimos, causadores da

redução do pH local, são responsáveis pela lixiviação dos sais presentes nas superfícies dos grãos e minerais do solo.

O resultado direto desta ação biológica e de processos químicos é o desenvolvimento de uma pluma condutora presente abaixo da água subterrânea, normalmente coincidente com a pluma dissolvida. Esta anomalia de condutividade possibilita a localização e mapeamento de plumas dissolvidas tanto pelos métodos elétricos, quanto pelo Geo-Radar. Este, através das áreas de atenuação de sinal.

De acordo com Sauck (1997), a falta de conhecimento sobre os fatores ou processos descritos acima e que relatam o comportamento dos hidrocarbonetos nas várias zonas em sub-superfície, resultam em interpretações muitas vezes errôneas.

Estudos realizados em laboratório por Cassidy *et al* (2001), também comprovaram tal incremento de condutividade, através da dissolução mineral (em especial carbonato) e produção de ácidos orgânicos e \*biosurfactantes pelas bactérias desenvolvidas. Neste estudo, uma amostra de solo proveniente de um local contaminado - onde se observaram anomalias de alta condutividade - foi lavada repetidamente até que seus constituintes solúveis fossem removidos, para então ser novamente recontaminada com diesel e seus poros preenchidos com água, visando uma melhor simulação de uma zona saturada impactada. Em continuidade, nutrientes foram adicionados em valores de concentração iguais aos observados em campo, resultando condições anaeróbicas durante os 120 dias de estudo.

A condição anaeróbica observada é proveniente da biodegradação do combustível através do consumo principalmente de oxigênio, com a conseqüente geração de altas taxas de sólidos totais dissolvidos, responsáveis indiretamente pelo aumento de condutividade.

De acordo com os mesmos autores, a correlação verificada permite a utilização de técnicas geofísicas de eletrorresistividade e Geo-Radar no monitoramento biogeoquímico dos contaminantes, como sua transformação em subprodutos.

\*produtos responsáveis pela desagregação das moléculas de hidrocarbonetos



Podem até ser utilizadas como substitutas iniciais das amostragens e análises das águas subterrâneas, visando uma redução nos custos de remediação. Podem ainda ser utilizadas no processo de verificação da atenuação natural do contaminante em si, opção viável e distinta da remediação, considerada atualmente interessante devido aos menores custos envolvidos.

EPA (2000), em estudos de monitoramento de uma pluma de contaminação gerada por dois eventos distintos de vazamento de óleo cru ocorridos numa mesma refinaria há cinquenta e trinta anos respectivamente, realizados através da utilização das técnicas de eletrorresistividade e Geo-Radar, detectaram uma alta resistividade na camada aerada do solo através de um perfil de resistividade dipolo-dipolo, seguindo-se de um gradiente para baixas resistividades no topo da camada saturada. Estas resistividades eram menores até do que as encontradas para a água subterrânea nos arredores. Esta área condutora iniciava-se justamente acima do nível d'água e é coincidente com a camada contendo produtos sob a fase livre. Isto foi novamente confirmado utilizando-se o Geo-Radar. As reflexões do GPR detectadas foram relatadas como provenientes de regiões com aumento da condutividade, responsáveis diretas pela delimitação da profundidade de penetração das ondas de rádio.

Os estudos acima citados levam a crer que o modelo básico, baseado em vazamentos controlados e experimentos de laboratório, não leva em conta a atuação bacteriológica como fator de mudança das características locais. Nestes estudos, usualmente se detectam altas resistividades e baixas permissividades, de forma contrária ao evidenciado por EPA (2000). Tal oposição força uma revisão do modelo básico conceitual, de forma a se considerar a idade do vazamento.

## **5. Procedimentos de campo – Material e Métodos**

### **5.1. Identificação da área**

A área de ensaios experimentais localiza-se no limite sudeste do município de Curitiba, mais precisamente no bairro do Alto Boqueirão. Possui como ponto central as coordenadas UTM 7174838 / 677820, encontrando-se localizada entre as antigas instalações da RFFSA\*(Rede Ferroviária Federal S.A.), atualmente de propriedade da empresa ALL – América Latina Logística, e o Rio Iguaçu, distante deste cerca de 700 m e cerca de 200 m de cavas e canais a ele interconectados. Seu acesso se dá através da Av. Marechal Floriano Peixoto, entrando-se à direita na Rua Nair Ferraz Azellato, quando se avista a linha férrea.

#### **5.1.1 Histórico da contaminação na área de estudo**

A área impactada recebeu durante cerca de vinte e cinco anos os efluentes gerados (após tratamento primário) de duas gerações de caixas separadoras água e óleo, provenientes de pequenos derrames de abastecimento de diesel e produtos de lavagem de locomotivas, como graxa e lubrificantes. Estes efluentes, mesmo com uma alta carga poluente, eram então direcionados para uma caixa de infiltração, que funcionava como um canalizador dos produtos contaminantes para o solo e águas subterrâneas.

\*cabe frisar que o passivo ambiental ainda encontra-se sob responsabilidade da RFFSA, a qual é proprietária da área e responsável direta pela contratação dos estudos preliminares a uma possível remediação.

Com a privatização da antiga RFFSA, as caixas separadoras foram desativadas e outra estrutura de tratamento foi construída em local distinto. Contudo, a porção anteriormente impactada continua sob responsabilidade da RFFSA.

Recentemente, motivada por uma atual gerência ambientalmente consciente, a RFFSA deu início às operações de levantamento e remediação dos possíveis contaminantes existentes.

A figura 14 retrata o estado de contaminação visual do local afetado, utilizando-se de fotografias aéreas, em três diferentes datas (1985, 1990 e 1999).

Com base nas fotos, verifica-se a princípio a inexistência de contaminação superficial no ano de 1985 e uma possível área de vegetação afetada por derrame ou posterior incêndio do produto (fato confirmado pelos moradores próximos) no ano de 1990.

No entanto, é visível o impacto local na foto de 1999, onde se diferencia a pluma superficial de produto proveniente da caixa separadora e sua respectiva área de influência sob a forma de leque, onde a vegetação encontra-se afetada e com coloração distinta.

FOTO AÉREA 1  
DATA 12/1999  
fonte: IPPUC/PMC

obs.: visível pluma de  
contaminação por  
hidrocarbonetos e  
respectiva área afetada



FOTO AÉREA 2  
DATA: 12/1990  
fonte: IPPUC/PMC

obs.: vegetação degradada  
por contaminação de  
hidrocarbonetos ou  
incêndio decorrente



FOTO AÉREA 3  
DATA: 11/1985  
fonte: COMEC

obs.: contaminação  
por hidrocarbonetos  
não detectável




 N  
0 50 100 150 m  
escala gráfica aproximada

Figura 14 - fotos aéreas comparativas de três períodos distintos

### **5.1.2 Geomorfologia e geologia local**

A geomorfologia local é dominada por um baixo relevo, característico da planície de inundação do Rio Iguaçu. A área de estudos em si encontra-se praticamente dentro de sua área de várzea, representada por terrenos alagadiços e vegetação característica. Cortando a área lateralmente, encontram-se dois pequenos córregos afluentes do Rio Iguaçu, sendo o primeiro (a sudoeste) de pequeno volume, e o segundo (a nordeste) de maior volume, o qual foi escavado ou alargado artificialmente de maneira a desempenhar no local a função drenante.

Quanto à geologia, a área insere-se na Bacia de Curitiba, em terreno preenchido por sedimentos aluvionares recentes que recobrem os sedimentos da Formação Guabirota, de idade Terciária-Quaternária, característicos da zona nordeste, leste e sudeste da cidade. Esta Formação é compreendida principalmente por duas sub-unidades litológicas de inter-relação complexa, depositadas em ambiente semi-árido, em sítios característicos de extensos leques aluvionais, que vistos em seção transversal apresentam-se com forma tipicamente lenticular, normalmente preenchidos por sedimentos de caráter arcossiano. Seus sedimentos são constituídos basicamente por argilitos (argilas montmoriloníticas), arcósios, areais e cascalhos. Os argilitos de coloração vermelha, às vezes com manchas verde clara, às vezes com nuances de coloração cinza, são predominantes e são intercalados pelas lentes arcossianas centimétricas, acunhaladas lateralmente, de granulometria grosseira e sub-angulosa, com coloração esbranquiçada a rosada.

Na área de estudo em especial, por se tratar de terreno de várzea, existe uma camada superficial rica em matéria orgânica de aproximadamente 50 cm, de consistência lodosa e coloração castanha, proveniente da decomposição da vegetação local. Com base nos dados das SEV's e caminhamentos elétricos 2D, o embasamento rochoso se localiza em média a aproximadamente 17 m de profundidade, sendo o restante do pacote litológico compreendido por argilas, o que denota uma natureza altamente condutora (auxiliada pelo freático aflorante), além de pacotes menores, lenticulares arenosos, intercalados em meio às argilas, caracterizados como relativamente mais resistentes.

A figura 15 retrata o modelo esquemático da área de estudos. Nela é possível distinguir as seguintes feições:

- I) o relevo local aplainado, bem como a proximidade da área de várzea do Rio Iguaçu;
- II) o nível d'água semi-aflorante e suspenso pela camada argilosa semi-impermeável inferior, bem como as lentes arenosas acumuladoras de água;
- III) a área ocupada pela oficina de máquinas e depósito de combustíveis, dispostos sobre terreno aterrado;
- IV) a estação de tratamento primário, bem como as caixas separadoras água/óleo (ambas já desativadas);
- V) os sedimentos predominantemente argilosos, intercalados por lentes de areia arcossiana;
- VI) a mancha de óleo visível em superfície atualmente e a provável distribuição em sub-superfície dos contaminantes quando ainda liberados, sob as fases residual, dissolvida e vapor.



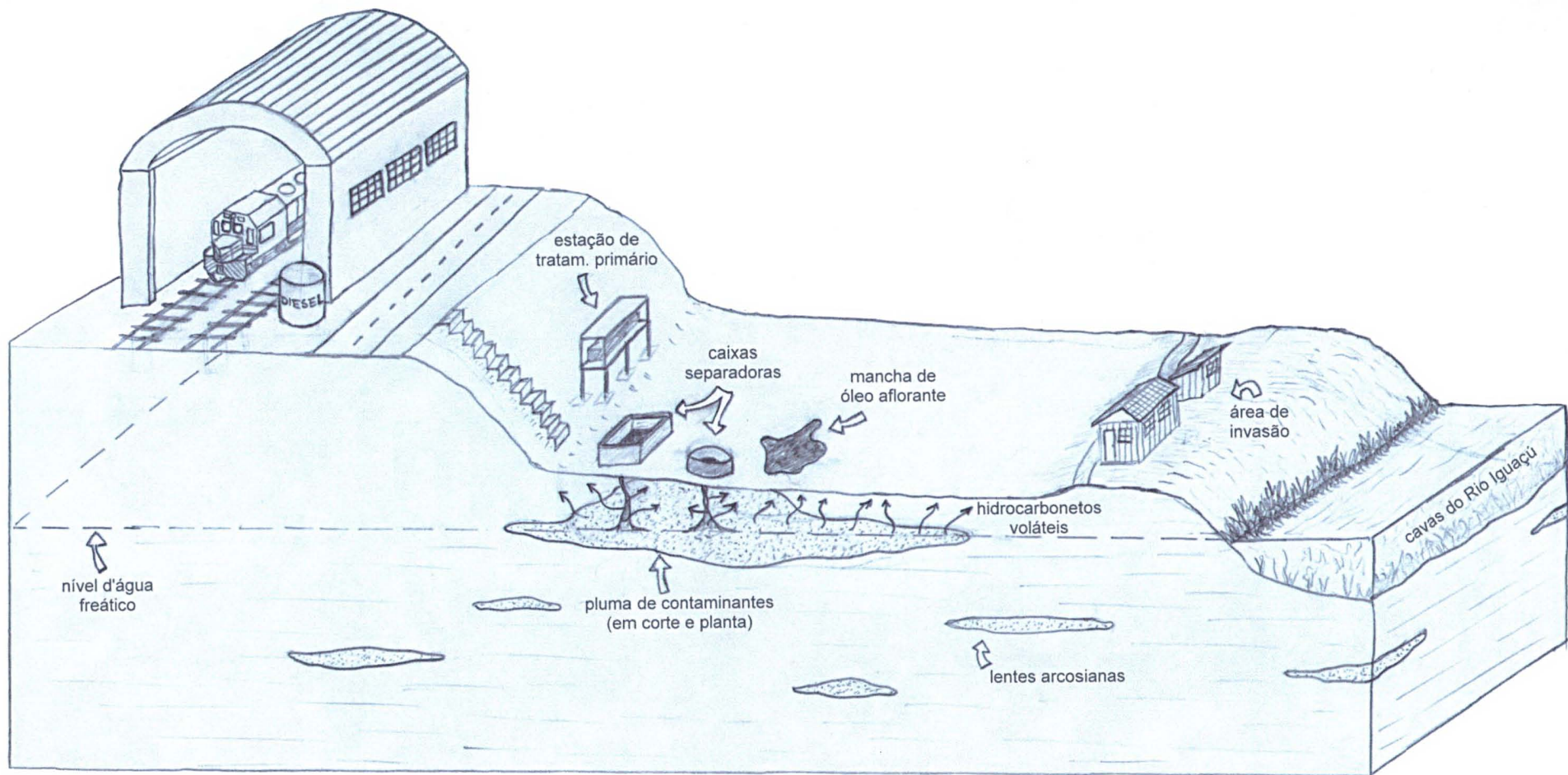


Figura 15 - modelo esquemático da área de estudos

### 5.1.3 Hidrogeologia local

Para a Formação Guabirotuba como um todo, a profundidade do lençol freático oscila em torno de 3,80 m, com variações sazonais em função dos períodos de chuva e seca. Na região de estudo, o freático encontra-se dividido numa porção superficial e aflorante, suspensa e limitada em sua base pela camada argilosa inferior (de condutividade hidráulica extremamente baixa), localizada a uma profundidade aproximada de 60 centímetros a 1,5 metros, caracterizando-se como um aquífero do tipo “suspenso”. Outra porção ocupa os interstícios das lentes arenosas (de granulometria média), localizando-se portanto em profundidades variáveis e com comunicação hidráulica muitas vezes espacialmente limitada. O gradiente hidráulico local, apesar do caráter aplainado da área, possui sentido Oeste-Leste, constatado pelas medições realizadas nos nove poços piezométricos e de monitoramento instalados dentro da área de investigação de 70x100 metros definida pela empresa consultora contratada (figura 16). Os respectivos níveis d’água verificados nos poços encontram-se na tabela 3 a seguir.

Tabela 3 – níveis d’água verificados nos poços piezométricos

<b>POÇO DE MONITORAMENTO (PM)</b>	<b>NÍVEL D’ÁGUA - N.A. (m)</b>
PM-01	0,580
PM-02	0,140
PM-03	0,430
PM-04	0,320
PM-05	0,860
PM-06	0,365
PM-07	0,595
PM-08	0,915
PM-09	1,090

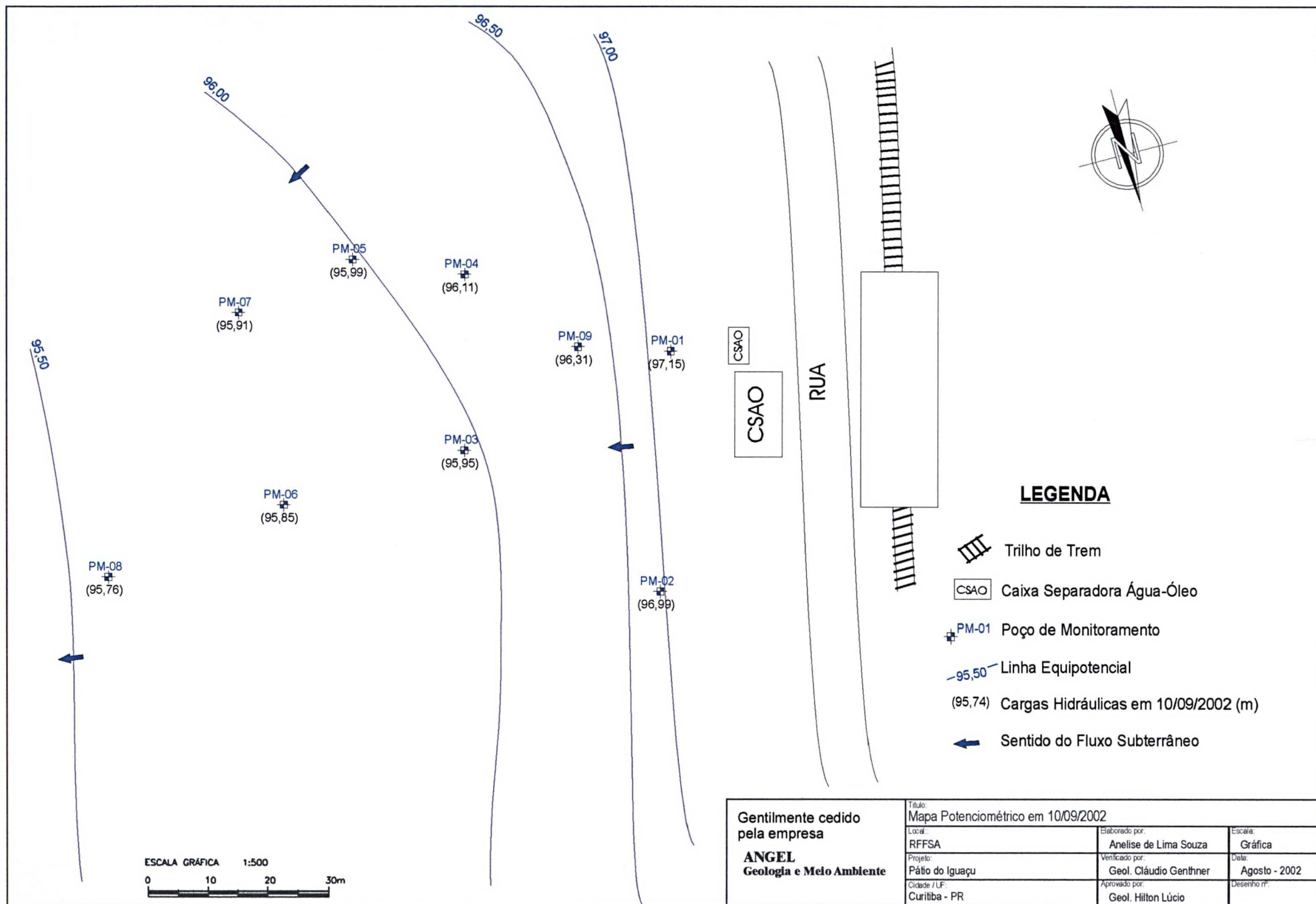


A Formação Guabirota é atualmente reconhecida como uma nova fonte de recursos a ser melhor explorada na Região Metropolitana de Curitiba, no que diz respeito aos recursos hídricos. Já sendo utilizada para fins industriais e secundariamente para o atendimento de uma pequena parcela da população, a água proveniente do Aquífero Guabirota, como denominado por diversos pesquisadores, tem seu potencial diretamente relacionado com as lentes arcossianas, dependendo de seu teor de argila e espessura das lentes, nas quais a água preenchida encontra-se confinada.

Estas águas, segundo dados da Sanepar não apresentam qualquer restrição ao seu uso, demonstrando pH entre 7 e 8, sem contaminações bacteriológicas detectadas e um teor de Ferro entre 1 a 3 mg/l, o que não pode ser entendido como inviabilizador da sua utilização, pois sua remoção é simples e de baixo custo.

Segundo Rosa F<sup>o</sup> *et al*, 1996, sua permeabilidade (k) nas porções lenticulares é de  $1,22 \times 10^{-4}$  m/s, o que corresponde a uma velocidade de fluxo das águas em torno de 44 centímetros/hora. Se considerarmos que uma pluma contaminante alcance as porções preenchidas com água através de fissuras ou canais preferenciais presentes nas argilas, de natureza pouco permeável, porções significativas de disponibilidade de água potável ficarão comprometidas, devido à alta velocidade de deslocamento do contaminante, que se utiliza da água como meio de transporte.

Figura 16 - mapa potenciométrico em 10/09/2002



#### **5.1.4 Características dos contaminantes**

Pelos relatos coletados e com base no histórico de contaminação na área de estudo, sabe-se que os efluentes tratados primariamente e descartados via caixas separadoras água / óleo, eram compostos de óleos, graxas e diesel, provenientes de serviços de manutenção e lavagem de máquinas, bem como de pequenos derrames de abastecimento e de eventuais transbordamentos dos tanques de armazenamento, fato que pode ser em parte reforçado pela coloração escura da mancha de contaminação observada na fotografia aérea de dezembro de 1999 (figura 14).

De acordo com EPA (1996), os hidrocarbonetos dividem-se normalmente em três categorias: (1) gasolinas; (2) destilados médios e (3) óleos pesados. Na figura 17, os destilados médios (2) referem-se ao querosene, diesel e óleo combustível e os óleos pesados (3), ao óleo lubrificante.

Os produtos pertencentes às categorias (2) e (3) podem conter até 500 componentes individuais e tendem a ser mais densos, menos voláteis, menos solúveis em água, portanto menos móveis do que os compostos encontrados na gasolina. São normalmente reconhecidos como PAH's ou hidrocarbonetos poliaromáticos, formando um grupo de pelo menos 16 sub-compostos principais.

A maioria dos componentes individuais incluídos nesta categoria de hidrocarbonetos contém entre 9 e 20 átomos de carbono cada um. Os compostos aromáticos leves como os BTEX (Benzeno, Tolueno, Etil benzeno e Xilenos) presentes em grande quantidade nas gasolinas, encontram-se sob a forma de traços e impurezas em meio aos destilados médios, não sendo mais encontrados em plumas de vazamento antigas, devido a sua alta taxa de biodegradabilidade, evaporação e solubilidade na água subterrânea.

Os óleos lubrificantes pesados e as graxas estão dentro da categoria dos óleos pesados e são similares em composição e características aos destilados médios. Os hidrocarbonetos desta classe são relativamente mais viscosos e insolúveis na água subterrânea do que os destilados médios, sendo por consequência mais imóveis em sub-superfície.

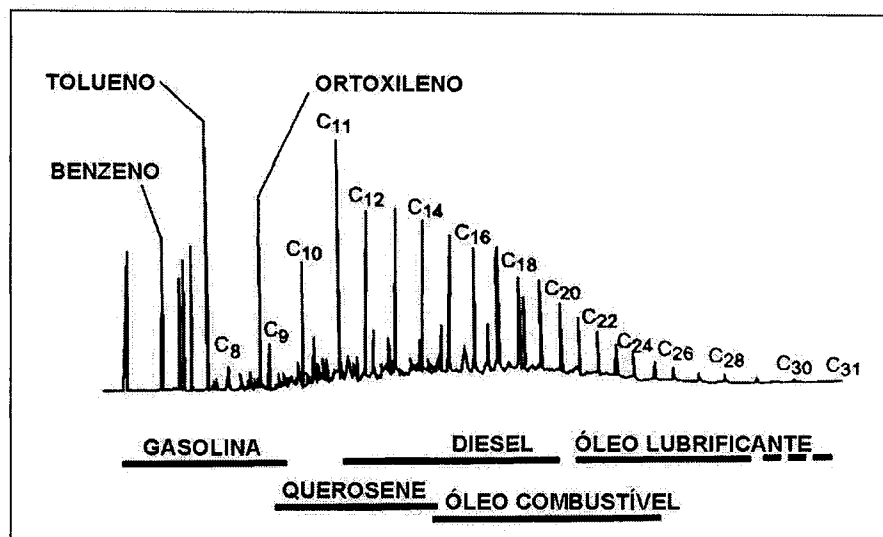


Figura 17 – cromatograma gasoso demonstrando os limites aproximados para individuais produtos de hidrocarbonetos (EPA, 1996)

A maioria dos compostos encontrados nos óleos pesados possuem mais de 14 átomos de carbono, podendo chegar a mais de 30. Como nas plumas antigas dos destilados médios, os componentes leves encontram-se somente sob a forma de traços.

Segundo Schianetz (1999), contaminantes destas categorias são reconhecidamente nocivos à saúde humana, chegando alguns a apresentarem poder mutagênico e carcinogênico, como o benzeno, tolueno, benzo(a)pireno dentre outros presentes nas composições das gasolinas e diesel.

## **5.2 Aquisição geofísica e processamento dos dados**

### **5.2.1 Técnicas de Eletrorresistividade**

Para esta categoria de levantamentos foi utilizado um resistímetro mono-canal da marca/modelo “Tectrol 24”, de fabricação nacional. De maneira a otimizarem-se os levantamentos optou-se pelo emprego de cabos múltiplos (*multi-core cable*) e de equipamento seletor de níveis.

Dentre os métodos elétricos, foram adquiridas 13 SEV's (sondagens elétricas verticais – anexo I) utilizando-se do arranjo *Schlumberger* com a finalidade de melhor avaliar a profundidade do embasamento rochoso, do lençol freático, dos sedimentos argilosos da Formação Guabirotuba, bem como dos sedimentos recentes aluvionares que a recobrem e, secundariamente, de uma possível resposta geoeletrica da contaminação por hidrocarbonetos. Para este fim, nestas sondagens a abertura do arranjo foi na maioria das vezes de 70 metros e 50 metros.

A SEV pode determinar uma pluma de contaminação, mesmo com pequena espessura da camada contaminada, se esta for contínua. Além disto, é de grande utilidade na calibração de outros métodos.

Em continuidade foram realizados 7 caminhamentos elétricos, com dipolos de 10 metros (anexo II). Estes levantamentos permitiram a perfilagem de uma extensão linear aproximada de 200 metros, cada linha investigando até uma profundidade de cerca de 22 metros. O arranjo expandiu-se lateralmente para ambos os lados da área inicialmente demarcada como impactada, que é de 70 x 100 metros, visando uma delimitação precisa da possível pluma contaminante investigada.

De maneira a melhor detalhar as camadas superiores, optou-se pela realização também de 6 caminhamentos elétricos com dipolos de 5 metros, também utilizando o arranjo dipolo-dipolo, sendo coincidentes com os levantamentos já efetuados com espaçamento de 10 metros, o que propiciou o detalhamento da profundidade até 11 metros. As seções ficaram assim compostas por 16 níveis de investigação, 8 com cada espaçamento. Isto constitui um excelente imageamento.

Tanto para a realização das SEV's, quanto dos caminhamentos elétricos 2D, foram utilizados eletrodos de aço inox, de maneira a permitir uma diminuição da polarização gerada pelo eletrodo. Estes foram facilmente introduzidos no solo graças à alta concentração da umidade local, ausência de seixos e cascalhos, bem como da presença de material turfoso na camada superficial, seguida de uma camada de argila plástica.

As SEV's foram processadas no programa desenvolvido por Rigoti & Crossley (1987), em ambiente DOS e os resultados apresentados através de gráficos bilogarítmicos. Tais valores serviram de base na avaliação dos dados e calibração dos outros métodos elétricos. Um modelo de 5 ou 6 camadas explica satisfatoriamente as curvas de resistividade aparente observadas. Em praticamente todos os casos obteve-se um ótimo ajuste entre os valores observados e os gerados pelo modelo.

Os dados de resistividade aparente dos caminhamentos elétricos foram inicialmente "plotados" na forma usual de pseudo-seções e posteriormente invertidos para um modelo 2D com o programa RES2DINV (Loke, 1999), para o que contou-se com a cooperação do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT.

A inversão foi rodada sobre pseudo-seções compostas de 16 níveis (8 com espaçamento de 5 metros e 8 com espaçamento de 10 metros)

Normalmente obteve-se um bom ajuste entre a pseudo-seção calculada e observada, com erro médio variando entre 5% e 8%; para as sete seções realizadas.

O processo de inversão 2D das pseudo-seções consistiu de muita experimentação com os parâmetros que controlam a convergência para o modelo final. Em especial, notou-se que a técnica de elementos finitos é preferível à de diferenças finitas. Também é mais estável a inversão, quando se utiliza uma combinação de "smooth inversion" (variação suave da resistividade) com o método de Marquardt (Loke, 1999).

Para evitar instabilidade numérica que causa valores extremamente altos ou baixos no modelo, foram utilizados limites de variação para a resistividade bem como a inversão robusta (Loke, 1999), tanto no tocante aos dados como ao modelo.

Finalmente, para permitir que todas as sete seções levantadas fossem interpretadas conjuntamente seguindo a mesma escala de cores de resistividade, todos os valores de resistividade inversa, obtidos em todos os níveis amostrados das seções, foram agrupados num único arquivo para posterior avaliação estatística, de onde se obtiveram os valores da média, 1º quartil (25% dos dados) e 3º quartil (75% dos dados), além dos valores mínimo e máximo, valores estes que guiaram a padronização da visualização final das seções.

Por último, os modelos 2D obtidos da inversão foram interpolados por níveis de investigação e transformados em mapas de resistividade das diversas profundidades analisadas, partindo-se da superfície (0,85 m) até o embasamento rochoso (16,41 m).

### **5.2.2 Geo-Radar - GPR**

Nos levantamentos Geo-Radar utilizou-se de equipamento Ramac, fabricado pela empresa sueca MALÄ. O sistema consiste de seis unidades: computador, unidade de controle, transmissor, receptor e duas antenas (transmissora e receptora).

As unidades transmissora e receptora são compostas por módulos eletrônicos acoplados às antenas que, por sua vez, estão conectadas por cabos de fibra ótica à unidade de controle. Já o computador tipo “laptop” é acoplado à unidade de controle utilizando-se de cabo de comunicação serial ou paralelo.

Numa seqüência de operação, a unidade de controle remete simultaneamente um sinal para o receptor e para o transmissor, este por sua vez gera um pulso de curta duração e alta voltagem que passa pela antena transmissora e é irradiado para o subsolo. A partir do sinal de controle, instantaneamente a unidade receptora entra em regime de gravação e, após o processo de coleta de todas as amostras do traço,

este dado é enviado para a unidade de controle, e desta para o computador, onde é visualizado e armazenado.

Os levantamentos de campo envolvendo o Geo-Radar foram realizados durante dois dias seguidos, utilizando-se das seguintes antenas: 100 e 50 Mhz não blindadas e antena de 100 Mhz blindada.

Num primeiro passo foram adquiridos 6 perfis GPR, frequência 100 Mhz (antena blindada), sendo 4 paralelos e 2 transversais às seções de caminhada elétrico. Cabe ressaltar que esta configuração de antena revelou-se ineficiente, não propiciando a visualização de nenhuma feição durante os levantamentos de campo.

Num segundo passo, foram adquiridos 7 perfis GPR, frequência 50 Mhz (antena não blindada), sendo 4 paralelos e 3 transversais, bem como 8 perfis GPR, frequência 100 Mhz (antena não blindada), sendo 5 paralelos e 3 transversais. Esta última configuração se mostrou, já no momento da coleta de campo ser a melhor escolha, pois propiciou a melhor visualização em tela de feições e limites de camadas e zonas anômalas.

Devido à fragilidade do equipamento, optou-se por não executar levantamentos em locais extremamente alagadiços e/ou cobertos por óleo, como no caso da mancha visível em superfície (figura 18). Por fim, para determinar a velocidade da onda localmente, foi realizada uma sondagem CMP, frequência 100 Mhz (antena não blindada) e uma sondagem CMP, frequência 50 Mhz (antena não blindada - anexo III). Nesta forma de aquisição, a partir do conhecimento da velocidade da onda GPR no meio - que foi igual a 63 m/ns - é possível realizar a conversão tempo x profundidade, como já descrito no capítulo 3.3.

Com relação ao processamento dos dados já coletados, utilizou-se o programa *GRADIX*<sup>®</sup>, da empresa Interpex USA, seguindo a seqüência simplificada descrita a seguir:



- remoção do “*drift*” do equipamento: remoção dos sinais da onda aérea;
- ajuste do tempo zero: definição da disposição do tempo zero do perfil;
- “*trace window*”: delimitação do traço dentro da janela de visualização;
- ajuste do tempo zero na superfície;
- limpeza de ruído instrumental;
- análise espectral: análise do espectro de amplitude e de fase de qualquer ponto do radargrama de forma individual;
- filtragem trapezoidal: remoção de frequências não desejadas utilizando-se de filtro “passa banda trapezoidal”;
- verificação da velocidade hiperbólica do refletor: caso existam refletores com velocidade hiperbólica igual à velocidade luz, estes são derivados da onda aérea;
- ganho: aplicação de ganhos combinados nos dados de maneira a melhor visualizarem-se os refletores mais fracos (foram utilizados os seguintes ganhos aplicados: linear, esférico, exponencial e constante);
- “*declip*”: restauração por interpolação, em deformações na onda em seus primeiros ciclos, causadas pela maior intensidade em amplitude das ondas direta e aérea com relação à energia refletida;
- “*moving average*”: substituição de diversos traços (em geral 5) por um traço alvo representativo da média dos traços substituídos;
- “*depht conversion*”: conversão dos radargramas em tempo para profundidade, através de um valor médio de velocidade obtido através da sondagem CMP, já descrita anteriormente
- “plotagem” dos perfis finais.

### 5.3 Amostragem

A coleta de amostras de solo e de água subterrânea ocorreu em duas etapas distintas, em pontos pré-determinados mostrados na figura 18. Na primeira, foram coletadas 5 amostras de solo, identificadas pelo código SRF-01 a 05, sendo as mesmas analisadas para os seguintes parâmetros: orgânicos (BTXE – benzeno, tolueno, xilenos e etil benzeno), inorgânicos, físicos e microbiológicos.

Também foi amostrada a água subterrânea proveniente de 9 poços de monitoramento instalados na área. Estas amostras foram identificadas pelo código ARF-01 a 09, analisadas segundo os seguintes parâmetros: orgânicos (BTXE), TPH (hidrocarbonetos totais de petróleo), PAH (hidrocarbonetos poliaromáticos), inorgânicos e microbiológicos. Ambas as amostras foram analisadas de acordo com os métodos preconizados pela 20ª edição do “*Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*”, segundo os registros de ensaio do laboratório utilizado. Os resultados analíticos de ambas as amostragens encontram-se nas tabelas 4 e 5.

As amostras de solo desta primeira etapa foram coletadas a aproximadamente 50 centímetros de profundidade, correspondente a um perfil de solo rico em matéria orgânica e material turfoso, utilizando-se de sacos de polietileno esterilizados.

As amostras de água subterrânea foram coletadas nos poços de monitoramento, que possuem em média dois metros de profundidade e seção filtrante no último 1,5 metro, após o respectivo esgotamento e recarga da água, utilizando-se de “*baylers*” esterilizados.

Devido ao fato de não ter sido detectada a presença de contaminantes em níveis significativos no solo e água subterrânea local, foi realizada numa segunda etapa, a coleta de amostras de solo de três profundidades distintas (1, 2.0 e 2.5 metros) de um mesmo ponto de sondagem (identificado pelo código SS-06), locado a partir da análise da seção comparativa (nº 5) entre os métodos de caminhamento elétrico e Geo-Radar, de maneira a identificar-se a possível presença de contaminantes nas distintas feições evidenciadas pelo GPR. Para a realização do furo de sondagem, optou-se pela utilização de revestimento, devido à presença de

solo mole argiloso e freático aflorante e suspenso, o que inviabilizou a sondagem direta a trado, pelo colapso das paredes do furo.

Da mesma forma, as amostras foram coletadas utilizando-se de material esterilizado e próprio para tal função, sendo depois acondicionadas em caixa térmica resfriada, para envio ao laboratório e análise do teor de PAH (hidrocarbonetos poliaromáticos). Os resultados analíticos da segunda campanha de amostragem encontram-se na tabela 6.

Tabela 4 – resultados analíticos das amostras de solo

	PARÂMETROS ANALISADOS	UNIDADE	SRF-01	SRF-02	SRF-03	SRF-04	SRF-05
Orgânicos	Benzeno	µg/Kg	nd	nd	nd	nd	nd
	Tolueno	µg/Kg	5	12	22	12	2
	Etil Benzeno	µg/Kg	1	nd	1	nd	nd
	m,p - Xilenos	µg/Kg	13	nd	3	nd	nd
	o - Xileno	µg/Kg	10	nd	2	nd	nd
	BTXE TOTAL	µg/Kg	29	12	28	12	2
	TPH	mg/Kg	11	nd	25	17	160
Inorgânicos	Potássio	mg/Kg	5.900	1.200	1.000	9.600	3.300
	Fosfato	mg/Kg	24,1	26,5	40,9	34,6	66,7
	Nitrito	mg/Kg	0,05	nd	nd	nd	nd
	Nitrato	mg/Kg	0,3	23,8	19,0	7,5	66,7
	N. total	mg/Kg	13,7	52,7	34,2	30,6	11,4
Físicos	pH	log(H <sup>+</sup> )	5,523	6,025	5,599	5,704	5,550
	Condutividade	µS	6	4	3	6	3
Micro-biológicos	Bactérias heterotróficas	(UFC/g)	200.00	400.00	400.00	10.400.000	7.000
	Bolores e Leveduras	(UFC/g)	20.000	300.00	80.00	250.000	3.500

nd = inferior ao limite de detecção

Tabela 5 – resultados analíticos das amostras de água subterrânea

	PARÂMETROS ANALISADOS	UNIDADE	ARF 01	ARF 02	ARF 03	ARF 04	ARF 05	ARF 06	ARF 07	ARF 08	ARF 09
Orgânicos	Benzeno	µg/Kg	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	Tolueno	µg/Kg	nd	nd	nd	nd	nd	86	7	150	nd
	Etil Benzeno	µg/Kg	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	m,p - Xilenos	µg/Kg	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	o - Xileno	µg/Kg	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	BTXE TOTAL	µg/Kg	nd	nd	nd	nd	nd	86	7	150	nd
	TPH	mg/Kg	nd	nd	nd	4,4	4,8	2,4	nd	1,3	1,8
Orgânicos (PAH's)	Naftaleno	µg/Kg	0,53	-	-	-	-	-	-	-	-
	Acenofetileno	µg/Kg	nd	-	-	-	-	-	-	-	-
	Acenafteno	µg/Kg	0,05	-	-	-	-	-	-	-	-
	Fluoreno	µg/Kg	0,04	-	-	-	-	-	-	-	-
	Fenantreno	µg/Kg	0,03	-	-	-	-	-	-	-	-
	Antraceno	µg/Kg	nd	-	-	-	-	-	-	-	-
	Fluoranteno	µg/Kg	nd	-	-	-	-	-	-	-	-
	Pireno	µg/Kg	nd	-	-	-	-	-	-	-	-
	Benzo(a)antraceno	µg/Kg	nd	-	-	-	-	-	-	-	-
	Criseno	µg/Kg	nd	-	-	-	-	-	-	-	-
	Benzo(b)fluoranteno	µg/Kg	nd	-	-	-	-	-	-	-	-
	Benzo(k)fluoranteno	µg/Kg	nd	-	-	-	-	-	-	-	-
	Benzo(a)pireno	µg/Kg	nd	-	-	-	-	-	-	-	-
	Indeno(1,2,3)pireno	µg/Kg	nd	-	-	-	-	-	-	-	-
	Dibenzo(a)antreceno	µg/Kg	nd	-	-	-	-	-	-	-	-
	Benzo(g,h,i)perilene	µg/Kg	nd	-	-	-	-	-	-	-	-
	TOTAL	µg/Kg	0,65	-	-	-	-	-	-	-	-
Inorgânicos	Potássio	mg/Kg	2,5	1,7	4,8	9,0	6,8	5,8	3,6	12,9	5,4
	Fosfato	mg/Kg	0,19	0,20	0,25	0,40	1,12	0,82	0,40	0,82	1,54
	Nitrito	mg/Kg	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	Nitrato	mg/Kg	0,2	0,1	nd	0,14	nd	nd	nd	0,11	0,48
	N. total	mg/Kg	0,9	0,9	0,51	2,34	1,64	2,92	3,84	3,95	5,24
Micro-biológicos	Bactérias heterotróficas	(UFC/g)	1750	7500	113.750	89.400	110.000	240.500	5.500	295.000	545
	Bolores e Leveduras	(UFC/g)	300	100	600	700	2300	5700	600	2000	2300

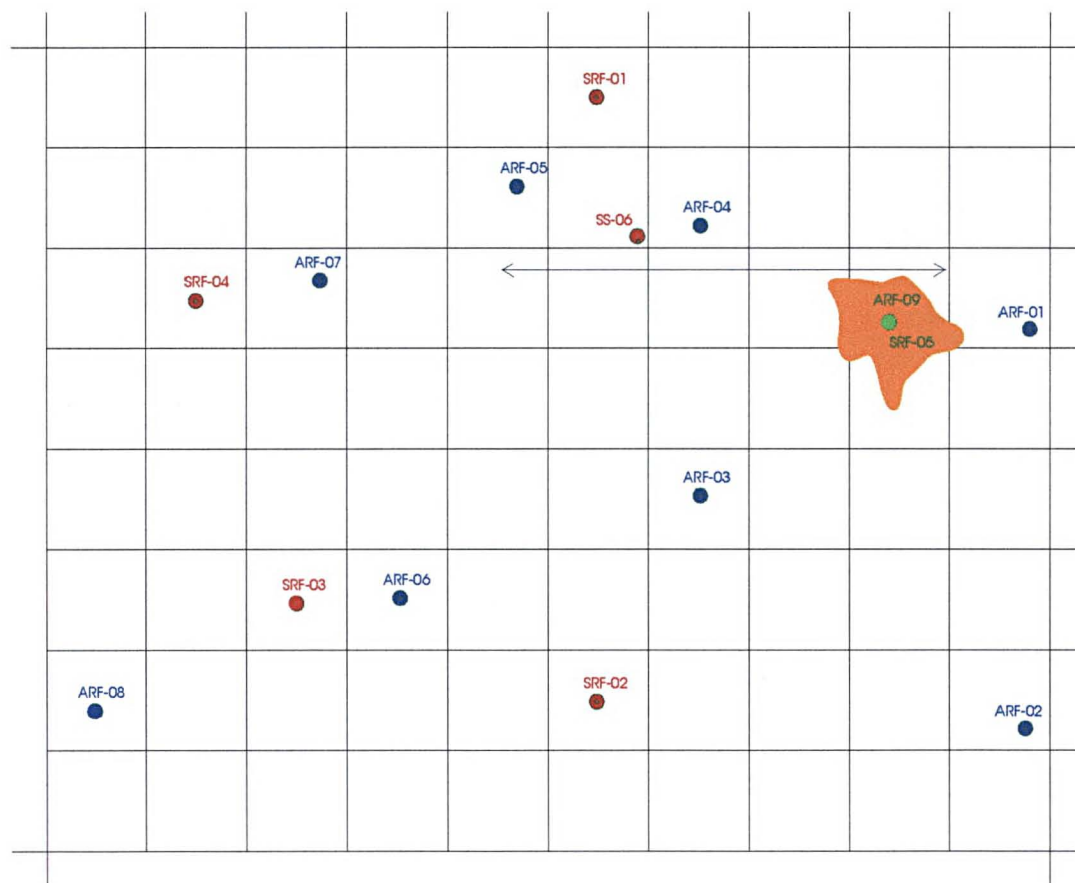
Tabela 6 – resultados analíticos das amostras de solo provenientes de furo de sondagem

	PARÂMETROS ANALISADOS	UNIDADE	SS-06 1.0 metro	SS-06 2.0 metros	SS-06 2,5 metros
Orgânicos (PAH's)	Naftaleno	µg/Kg	<0,01	<0,01	<0,01
	Acenofetileno	µg/Kg	<0,01	<0,01	<0,01
	Acenafteno	µg/Kg	0,09	0,05	<0,01
	Fluoreno	µg/Kg	<0,01	<0,01	<0,01
	Fenantreno	µg/Kg	0,03	0,03	<0,01
	Antraceno	µg/Kg	<0,01	<0,01	<0,01
	Fluoranteno	µg/Kg	<0,01	<0,01	<0,01
	Pireno	µg/Kg	<0,01	<0,01	<0,01
	Benzo(a)antraceno	µg/Kg	<0,01	<0,01	<0,01
	Criseno	µg/Kg	<0,01	<0,01	<0,01
	Benzo(b)fluoranteno	µg/Kg	0,37	0,03	<0,01
	Benzo(k)fluoranteno	µg/Kg	0,12	0,02	<0,01
	Benzo(a)pireno	µg/Kg	0,02	<0,01	<0,01
	Indeno(1,2,3)pireno	µg/Kg	<0,01	<0,01	<0,01
	Dibenzo(a)antreceno	µg/Kg	<0,01	<0,01	<0,01
	Benzo(g,h,i)perilene	µg/Kg	<0,01	<0,01	<0,01
	TOTAL	µg/Kg	0,63	0,13	<0,01

<0,01 = inferior ao limite de detecção

Figura 18 - mapa de localização dos pontos amostrados

ESCALA GRÁFICA 1:500



LEGENDA:

- - Amostragem de água e solo
- - Amostragem de água/Poço de Monitoramento
- - Amostragem de solo

CONVENÇÕES:

- Manilha de concreto
- Escada
- Talude
- Pluma aparente



Gentilmente cedido  
pela empresa  
**ANGEL**  
Geologia e Meio Ambiente

Título: Mapa de Localização dos Pontos Amostrados		
Local: RFFSA	Elaborado por: Anelise de Lima Souza	Escala: Gráfica
Projeto: Pátio do Iguaçu	Verificado por: Geol. Cláudio Gentner	Data: Agosto - 2002
Cidade / UF: Curitiba - PR	Aprovado por: Geol. Hilton Lúcio	Desenho nº:

## **6 Análise e interpretação dos dados**

### **6.1 Técnicas de Eletrorresistividade**

O resultado demonstrado pelas SEV's (anexo I), com localização apresentada na figura 21, em sua grande maioria retrata um modelo de ambiente composto por 5 ou 6 camadas, assim distribuídas: A primeira camada se estende da superfície até em média 0,5 metros de profundidade, com resistividades em torno de 75 Ohm-m, correspondendo a um ambiente composto por material turfoso, elevado teor de matéria orgânica e alta concentração de água, sob a forma de um aquífero suspenso por uma camada argilosa de pequena espessura, que não é individualizada nas sondagens.

A segunda camada, delimitada em média pelas profundidades de 0,5 metros a 2,1 metros, com resistividade em torno de 360 Ohm-m, compreende em sua porção superior (0,5 a 1,8 metros) um pacote predominantemente composto por material orgânico não saturado, com uma camada argilosa com leve iridiscência, de coloração escura e de pouca espessura em sua base; seguido de uma camada de argila, de característica extremamente plástica e coloração castanha, com espessura aproximada de 30 centímetros. Cabe frisar que a sondagem elétrica vertical não individualizou esta camada em seus três sub-pacotes acima descritos, o que foi realizado via sondagem a trado.

A terceira camada, delimitada em média pelas profundidades de 2,1 metros a 6,0 metros, com resistividade em torno de 142 Ohm-m, compreende em sua porção superior (2,1 a 4,0 metros) um pacote composto por material arenoso de granulometria média e saturado em água, seguido de um pacote provavelmente de granulometria inferior, entre a fração areia fina e silte, já que a verificação por sondagem ocorreu somente até a profundidade de 2,5 metros; no entanto, cabe ressaltar que nos perfis GPR (figura 23) é comprovada a continuidade desta feição com relação a seu poder refletivo, entretanto com menor intensidade.

A quarta camada, delimitada em média pelas profundidades de 6,0 metros a 13,0 metros, demonstra resistividades distintas em dois grupos de SEV's, o primeiro compreendido pelas SEV's de número 2, 3, 7 (figura 19) e 8, com resistividades em torno de 78 Ohm-m; e o segundo, compreendido pelas SEV's de número 4, 6, 9 (figura 20), 10, 11 e 12, com resistividades em torno de 35 Ohm-m. O primeiro grupo e de maior resistividade, corresponde às SEV's que realizadas sobre áreas com maior concentração de estratos arenosos em meio às argilas, como pode ser observado no perfil GPR 4, já o segundo grupo é representativo de um espesso pacote argiloso condutor que se estende até o embasamento cristalino. É importante ressaltar ainda que as SEV's de número 2, 3, 7, 8 foram as únicas que necessitaram de um ajuste de 6 camadas, sendo sua quinta camada, de resistividade média em torno de 18 Ohm-m e limites de profundidade entre 13,0 e 17,5 metros, considerada análoga à quarta camada das SEV's 4, 6, 9, 10, 11 e 12, de resistividade 35 Ohm-m, variando apenas quanto à maior ou menor proximidade das zonas de alteração do embasamento cristalino. Para a melhor visualizar os exemplos referentes aos dois grupos mencionados acima, as figuras 19 e 20 mostram as SEV's de número 7 e 9.

Por fim, a quinta camada, que inicia a aproximadamente 13,0 m de profundidade nas SEV's 4, 6, 9, 10, 11 e 12, e a 17,5 metros de profundidade aproximadamente nas SEV's 2, 3, 7 e 8 (onde é considerada como uma sexta camada), estendendo-se até o final do perfil de sondagem, com resistividade em torno de 2040 Ohm-m, corresponde ao início do embasamento cristalino, o que condiz com a bibliografia disponível.

Num contexto geral, diferem as SEV's 1, 13 e 14. A primeira por encontrar-se em relevo mais elevado, em local seco e sem a presença da turfa já descrita, o que fez com que o nível de maior resistividade, neste caso específico igual a 466 Ohm-m, considerado como segunda camada nas outras SEV's analisadas, aqui ocorresse como terceiro nível, entre as profundidades de 3,3 e 6,1 metros. Já as SEV's 13 e 14 foram realizadas com o intuito de se avaliar o modelo de fundo local, no entanto ainda apresentaram um segundo nível resistivo (110 e 238 Ohm-m respectivamente), que poderia ser correlacionado com o segundo nível já descrito



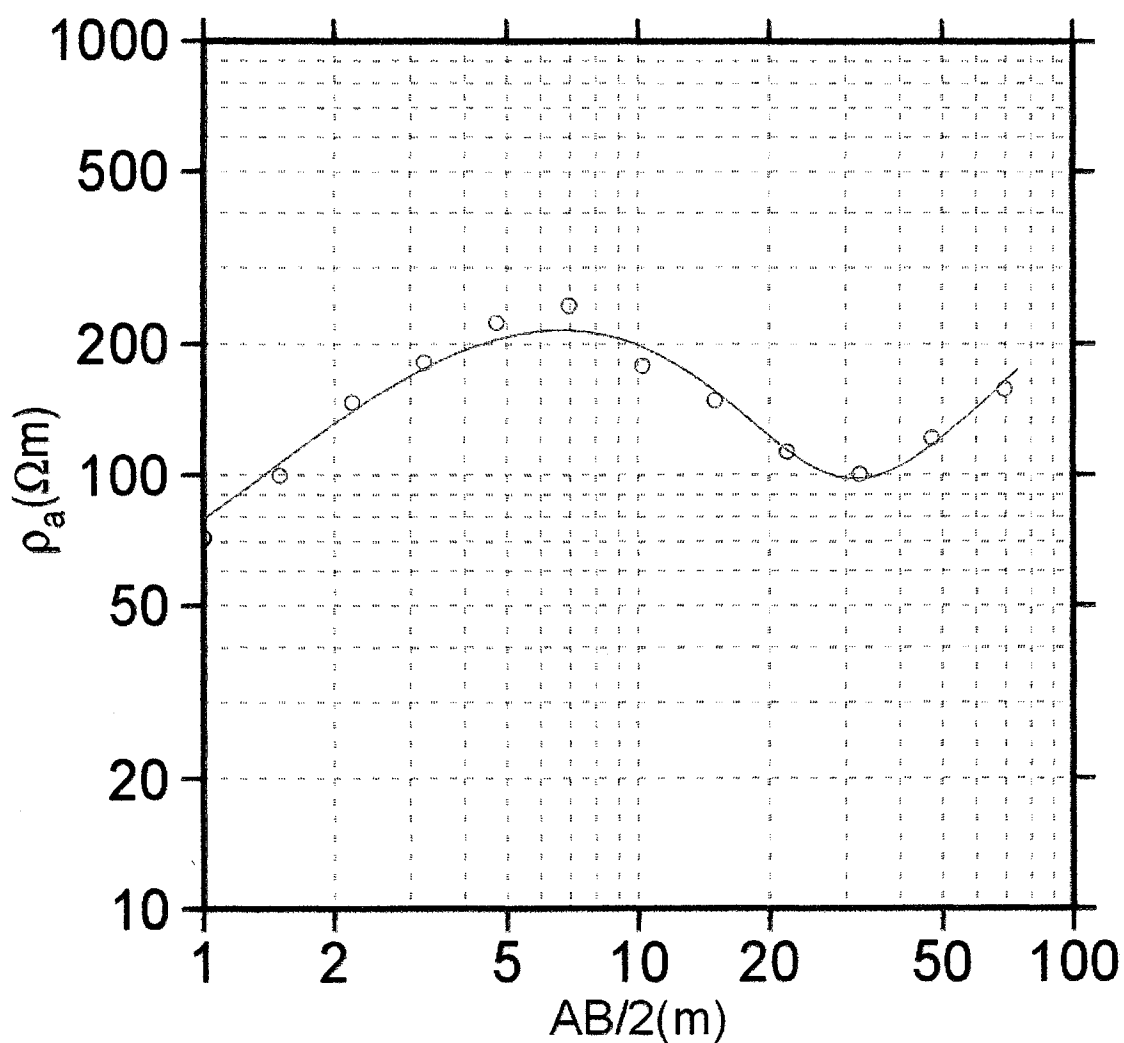
nas outras sondagens elétricas, variando apenas com relação à espessura do pacote orgânico e da maior ou menor presença de água e/ou umidade.

Com relação aos levantamentos envolvendo o caminhamento elétrico, obteve-se como produto final após processamento, a superposição das sete seções modelo de resistividade paralelas (figura 21) envolvendo o arranjo dipolo-dipolo e espaçamento entre eletrodos de 5 e 10 metros, para comparação e possível localização de anomalias resistivas ligadas à presença de hidrocarbonetos contaminantes, ou anomalias condutoras relacionadas às áreas onde os mesmos já haviam sido biodegradados, como descrito na literatura. As pseudo-seções originais encontram-se no anexo II.

Apesar das seções possuírem em média 200 metros de extensão, o limite da malha se estende nestes levantamentos entre a posição 100 e 170 metros (correspondente nas fotografias – anexo IV – à área sem vegetação). Portanto as análises de solo e águas subterrâneas realizadas e demarcadas na figura 18, encontram-se dentro desta área limite.

Nas seções modelo de resistividade, notam-se dois altos de resistividade: o primeiro localizado nas porções basais, refletindo a aparição do embasamento cristalino, em concordância com as SEV's realizadas, e o segundo, mais superficial, partindo de dois focos pontuais observados na seção 1, entre as profundidades de 3,3 e 7,4 metros (condizente com a SEV 1), espalhando-se horizontalmente e emergindo para a superfície, com posterior diminuição de sua espessura vertical.

Entre estes limites superior e inferior, delimitados por altos de resistividade, encontra-se uma porção homogênea e tabular, com espessura em torno de 10 metros na seção 2, e de 5 metros aproximadamente na seção 6. Tal feição geofísica, aliada a sua baixa resistividade (em torno de 20 Ohm-m), retrata um pacote composto por argila em ambiente saturado, característico da coluna sedimentar da Formação Guabirotuba.



MODELO DE 6 CAMADAS

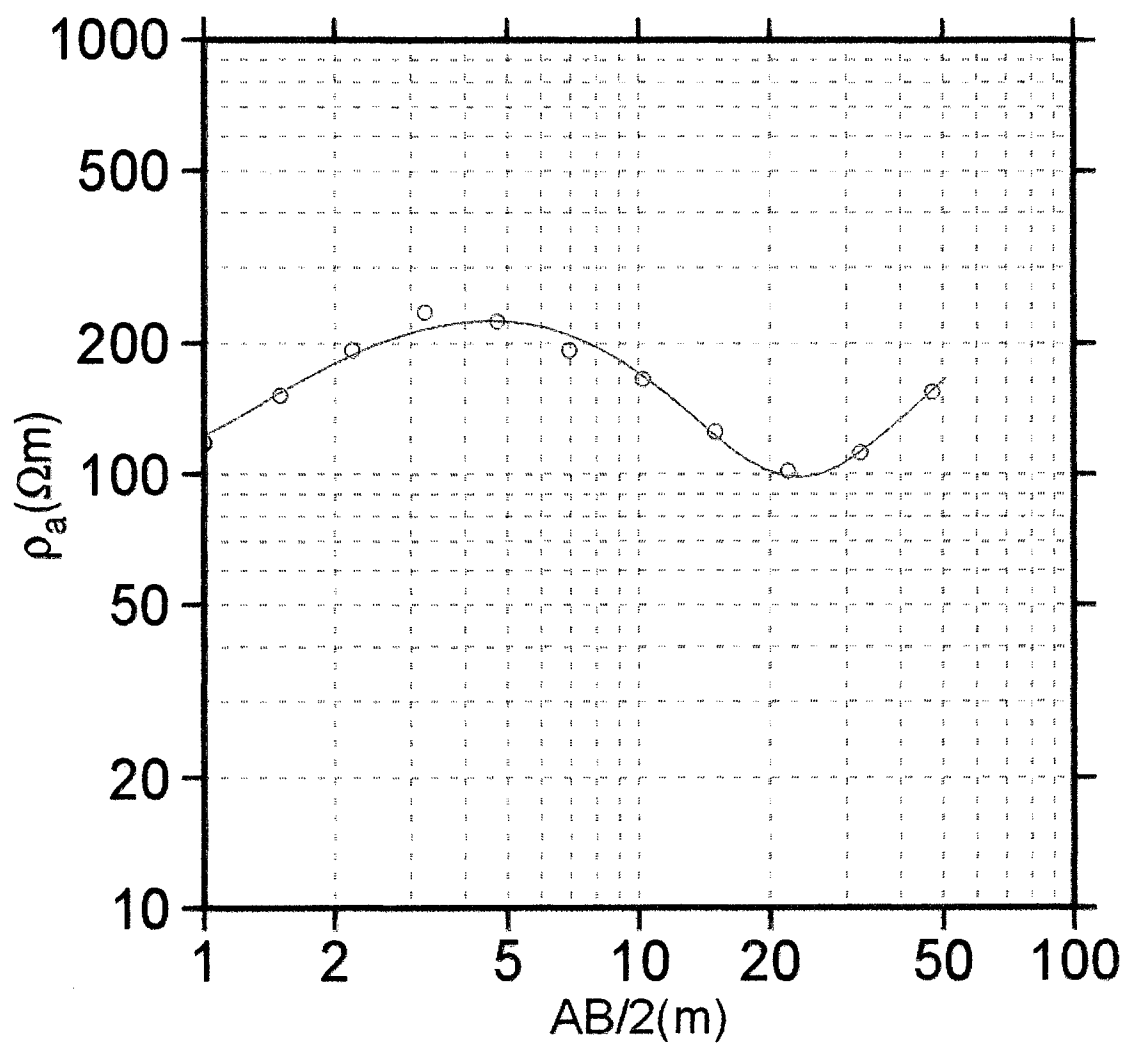
Camada	Res(ΩM)	ESPESSURA(M)	PROF.(M)
1	43	0,5	0
2	492	1,9	0,5
3	154	3,3	2,4
4	75	7,2	5,7
5	18	4,5	12,9
6	2048		17,4

Circulos: valores medidos

Curva: produzida pelo modelo

RFFSA - SEV7

Figura 19 - SEV nº 7



MODELO DE 5 CAMADAS

Camada	Res(ΩM)	ESPESSURA(M)	PROF.(M)
1	78	0,5	0
2	390	1,7	0,5
3	164	4,1	2,2
4	33	8,1	6,3
5	2030		14,4

Circulos: valores medidos

Curva: produzida pelo modelo

RFFSA - SEV9

Figura 20 - SEV nº 9



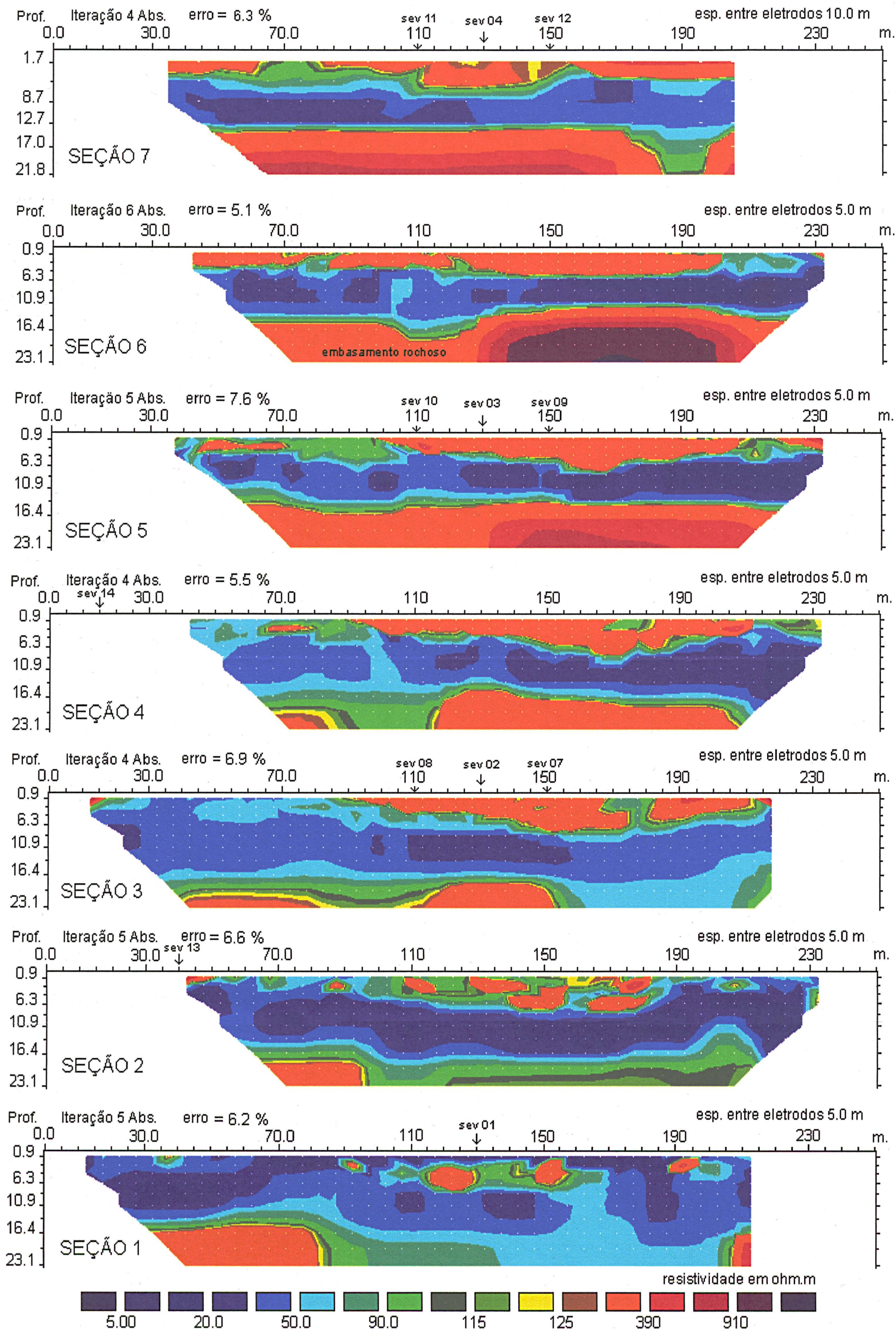
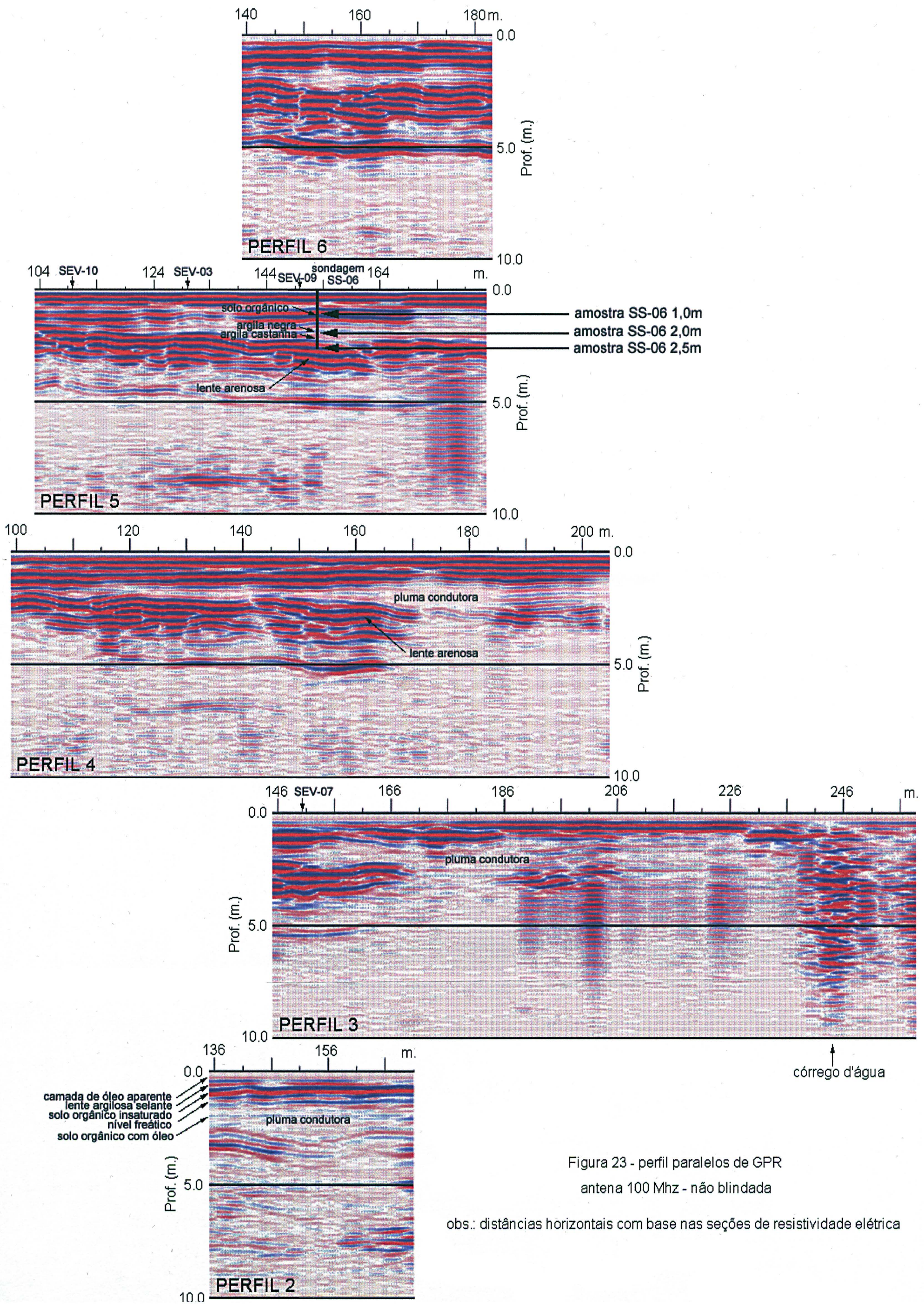
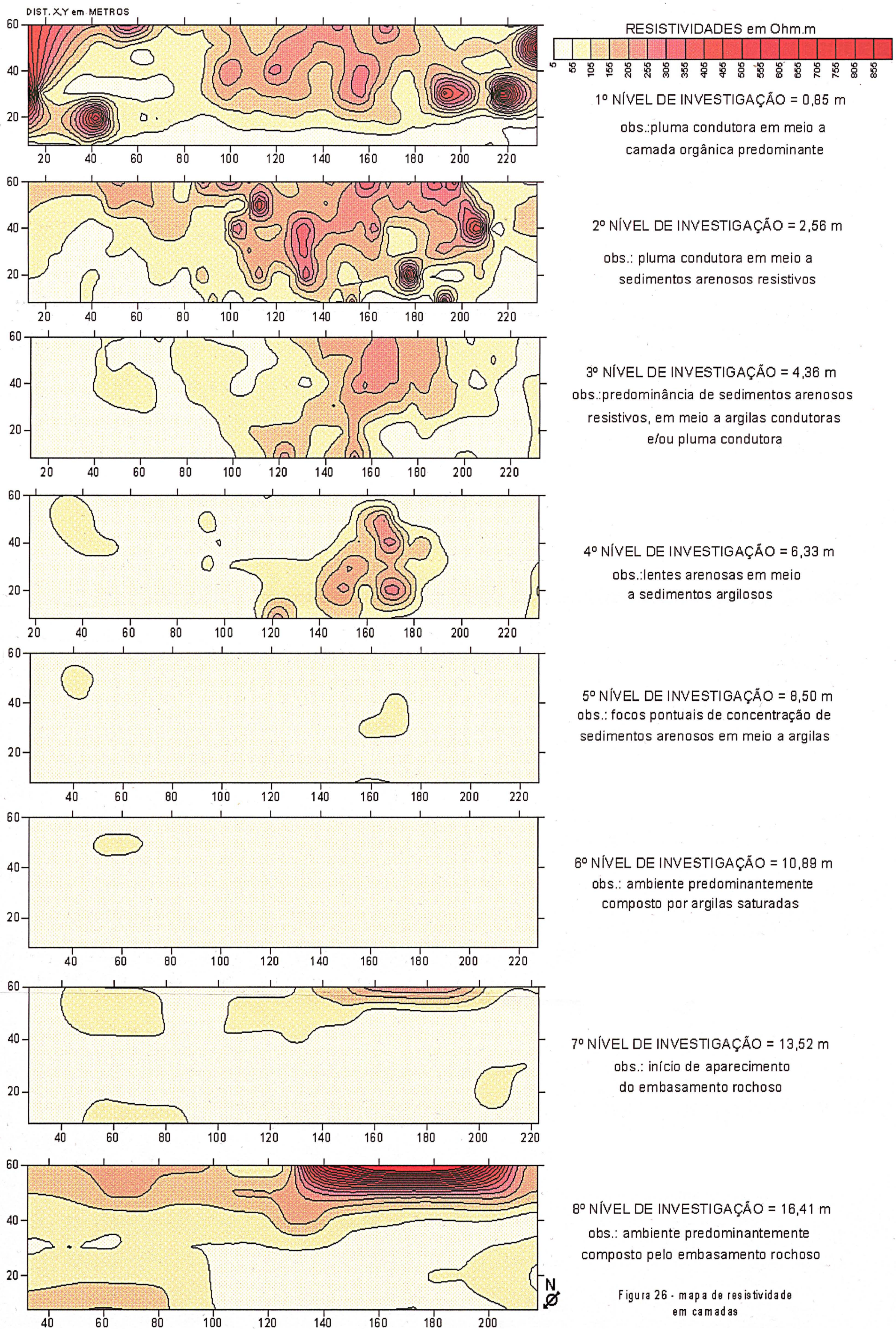


Figura 21 - seções modelo de resistividade











## **6.2 Geo-Radar - GPR**

Como descrito no capítulo 5.2.2, diversas frequências e configurações de antenas foram utilizadas nos levantamentos Geo-Radar. No entanto, serão aqui comentadas as seções adquiridas com o par de antenas de 100 Mhz não blindadas, por terem demonstrado a melhor relação profundidade x resolução. As seções adquiridas com o par de antenas de 50 Mhz se encontram no anexo III.

Para a aquisição dos perfis de reflexão com afastamento constante, foi utilizado um arranjo biestático com as antenas posicionadas perpendicularmente à direção do perfil. A separação entre as antenas de transmissão e recepção foi de 1 metro.

Devido à inacessibilidade de certos locais dentro da área de estudos, pela excessiva quantidade de água ou borra oleosa visível (perfis 2 e 3), os perfis variaram em extensão e limites de início e término, conforme pode ser observado na figura 22.

Praticamente todos os perfis analisados (figura 23) - paralelos às seções de caminhamento elétrico de número 2 a 6 - apresentam uma camada superior resistiva e contínua, partindo da superfície até uma profundidade em torno de 0,80 a 1,50 metros, com exceção dos perfis 2 e transversal 1, e perfil 3, onde se nota uma camada condutora de pouca espessura (aprox. 40 cm) relativa à presença de argilas e de borra de óleo respectivamente). Esta camada é compreendida em sua porção superior (entre a superfície e 0,50 metros) por um ambiente composto por material turfoso, seguido de um pacote com elevada concentração de matéria orgânica.

Logo abaixo deste pacote nota-se a presença de uma camada de natureza condutora, sendo a mesma descontínua e de espessura variável, muitas vezes interligando-se com a camada mais basal do perfil, que ocorre entre 5,0 e 10,0 metros aproximadamente - de natureza reconhecidamente condutora e associada às argilas saturadas da Formação Guabirotuba - sem apresentar nítida diferenciação de condutividade. Após verificação por sondagem, foi possível associá-la a sedimentos argilosos escuros e com leve iridiscência em sua porção superior e sedimentos plásticos argilosos de coloração castanha em sua porção inferior.

Entre a camada condutora acima descrita e a camada basal do perfil composta por argilas saturadas, ocorrem lentes de areia quartzosa, com granulometria média, espessura variável e feição levemente tabular.

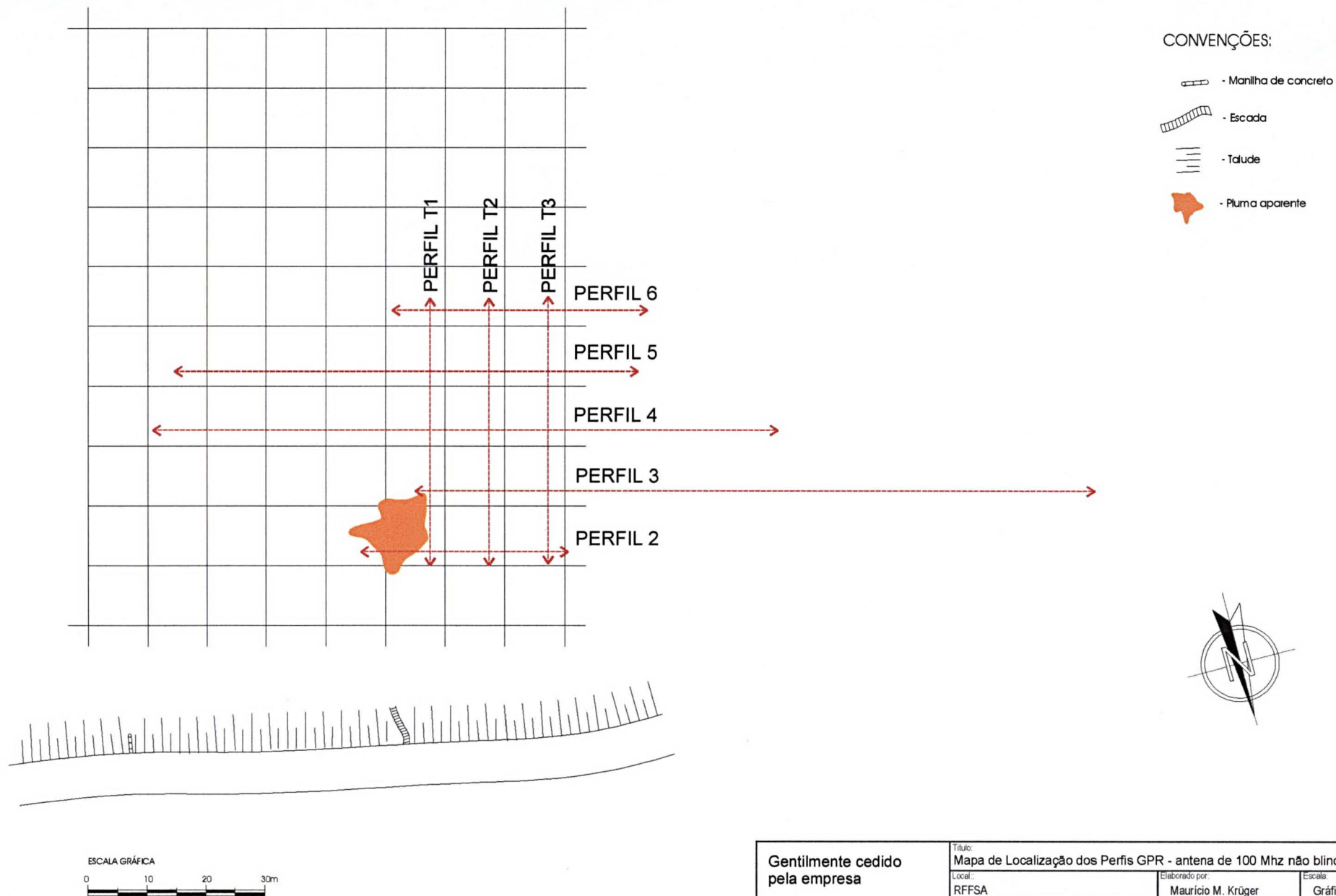
Outros três perfis Geo-Radar foram realizados, transversais aos anteriores (figuras 24a, 24b e 24c), localizando-se ao lado direito (sudoeste) da mancha de óleo visível em superfície, sendo ambos com extensão de 45 metros, com início no perfil 2 e término no perfil 6.

Nestes perfis é possível observar a mesma intercalação de camadas descrita nos perfis anteriores, com a distinção da presença de uma nítida pluma condutora localizada no intervalo de amostragem superficial de 0 a 10,0 metros no perfil T1, coincidente com a mancha de óleo visível em superfície (figuras 18 e 22). Ao se observar os perfis T2 e T3 em sequência, tal feição se expande lateralmente, confundindo-se com os sedimentos basais condutores, não permitindo portanto a limitação da suposta pluma condutora e as argilas condutoras.

A figura 24d retrata a aquisição CMP realizada com a frequência de 100 Mhz, na qual caracterizou-se a velocidade da onda GPR no meio como igual a 63 m/ns, como já descrito anteriormente.



Figura 22 - mapa de localização dos perfis GPR



Gentilmente cedido  
pela empresa  
**ANGEL**  
Geologia e Meio Ambiente

Título: Mapa de Localização dos Perfis GPR - antena de 100 Mhz não blindada		
Local: RFFSA	Elaborado por: Maurício M. Krüger	Escala: Gráfica
Projeto: Pátio do Iguaçu	Verificado por:	Data: Agosto - 2002
Cidade / UF: Curitiba - PR	Aprovado por:	Desenho nº:

[VERSION: 10 DEPTH CONVERSION]  
 [GAIN: EXPONENTIAL/SPHERICAL]  
 [HORIZONTAL SCALE: 1:590.6]  
 [VERTICAL EXAGGERATION: 3.9:1]

[100MHZ] [Prof7]

[04-SEP-02 18:18]

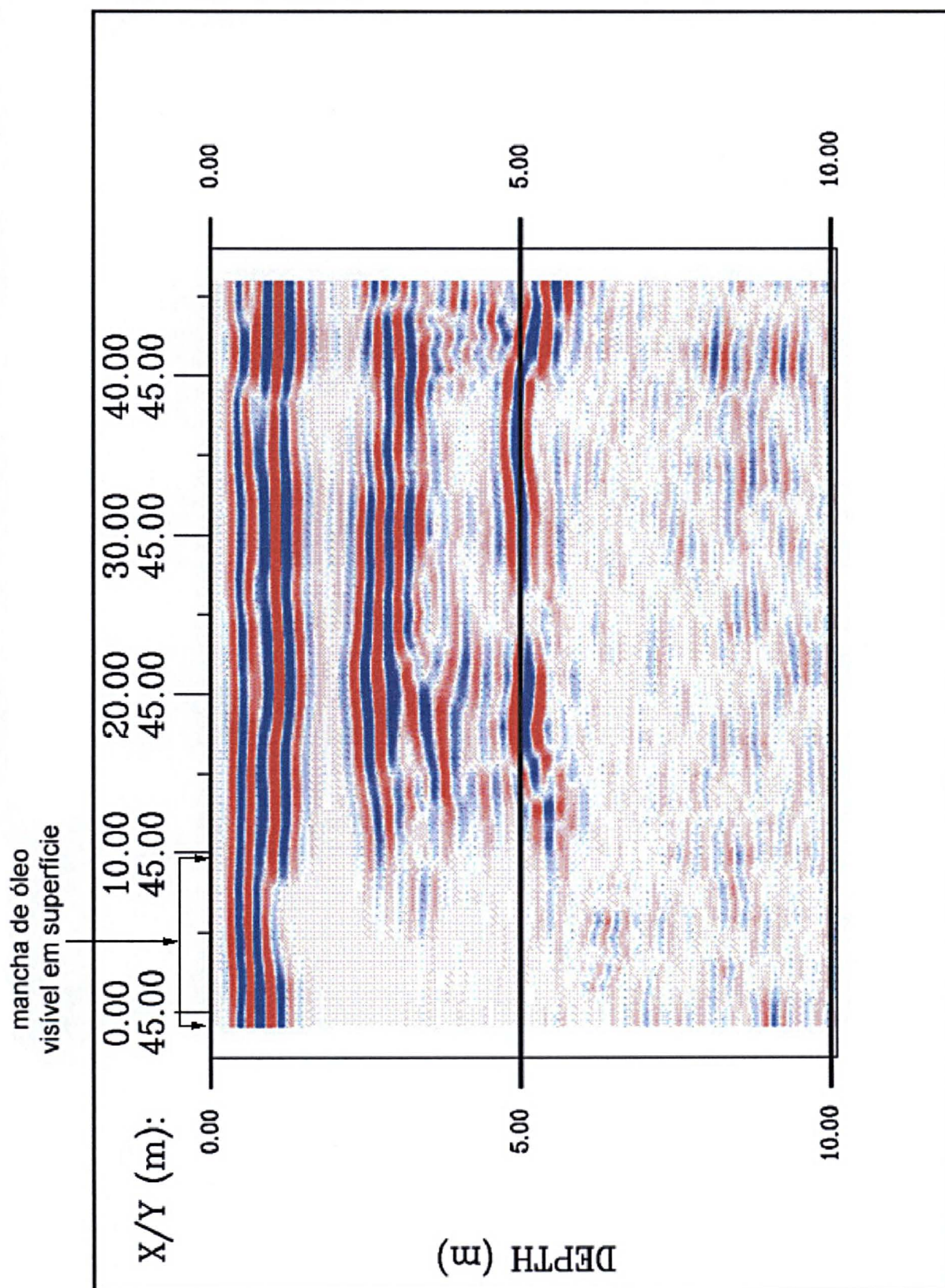


Figura 24a - perfil transversal de GPR - T1



[VERSION: 10 DEPTH CONVERSION]  
 [GAIN: EXPONENTIAL/SPHERICAL]  
 [HORIZONTAL SCALE: 1:590.6]  
 [VERTICAL EXAGGERATION: 3.9:1]

[100MHZ] [Prof8]

[04-SEP-02 18:22]

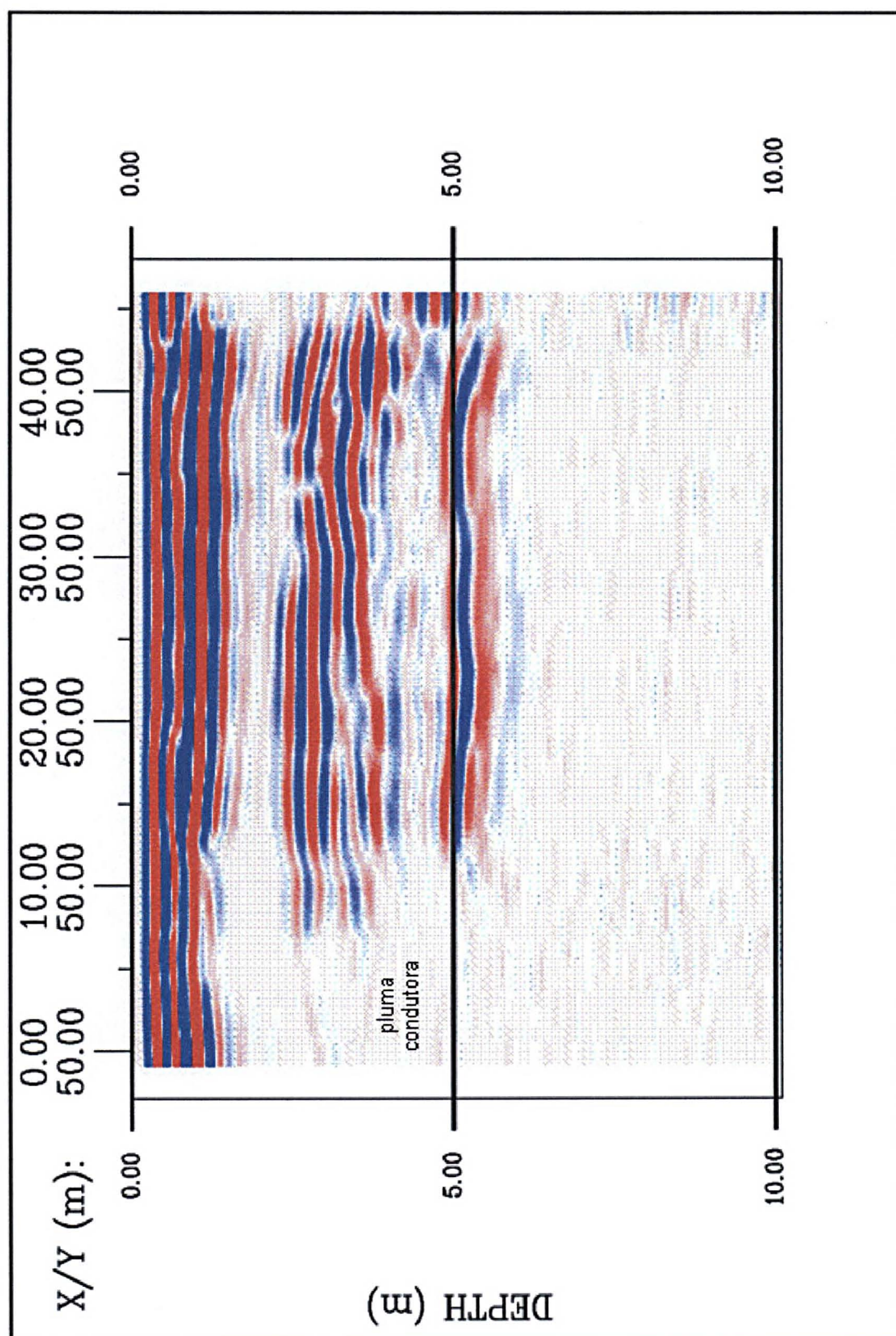


Figura 24b - perfil transversal de GPR - T2

[VERSION: 11 DEPTH CONVERSION]  
[GAIN: EXPONENTIAL/SPHERICAL]  
[HORIZONTAL SCALE: 1:590.6]  
[VERTICAL EXAGGERATION: 3.9:1]

[100MHZ]

[Prof9]

[04-SEP-02 18:25]

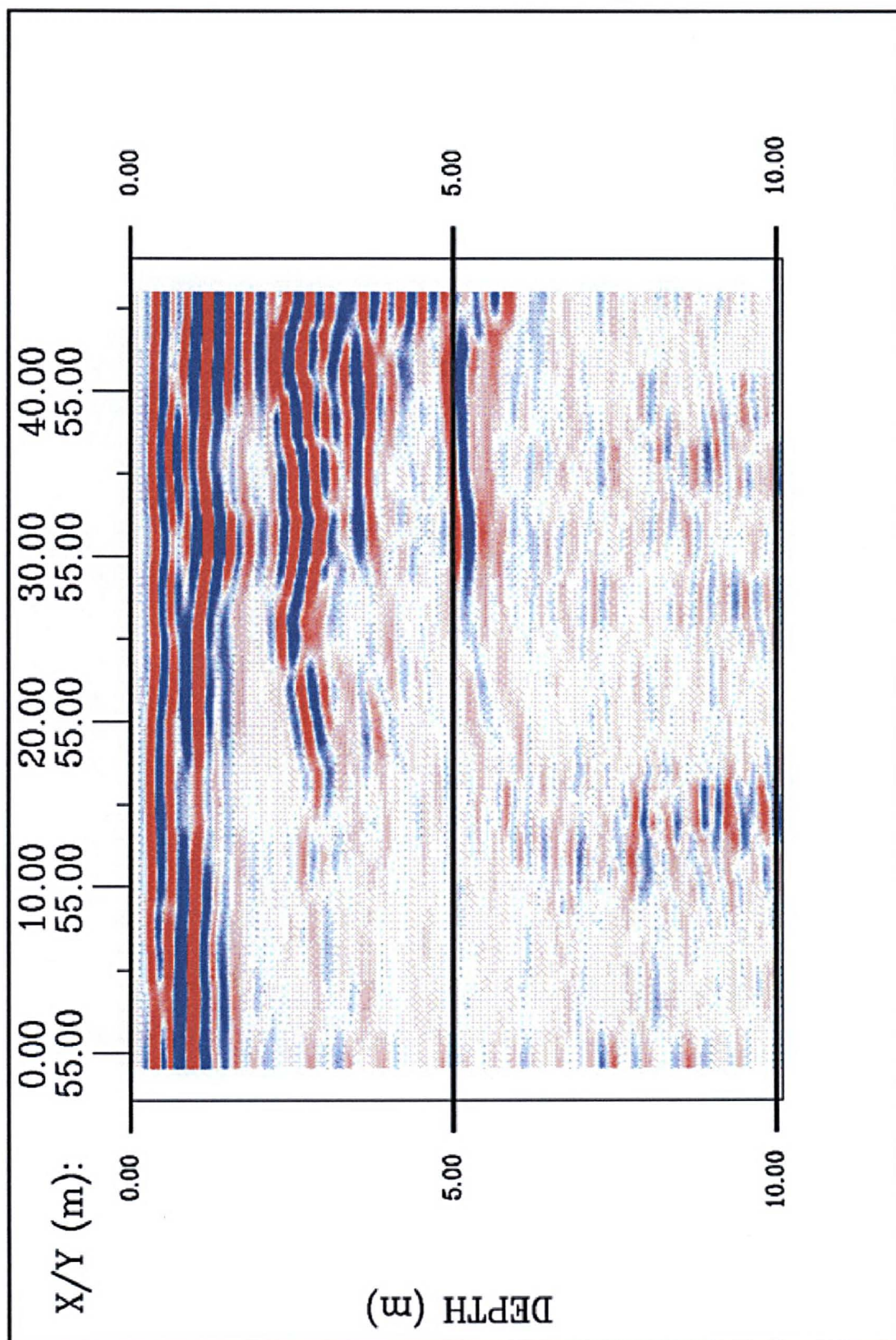


Figura 24c - perfil transversal de GPR - T3



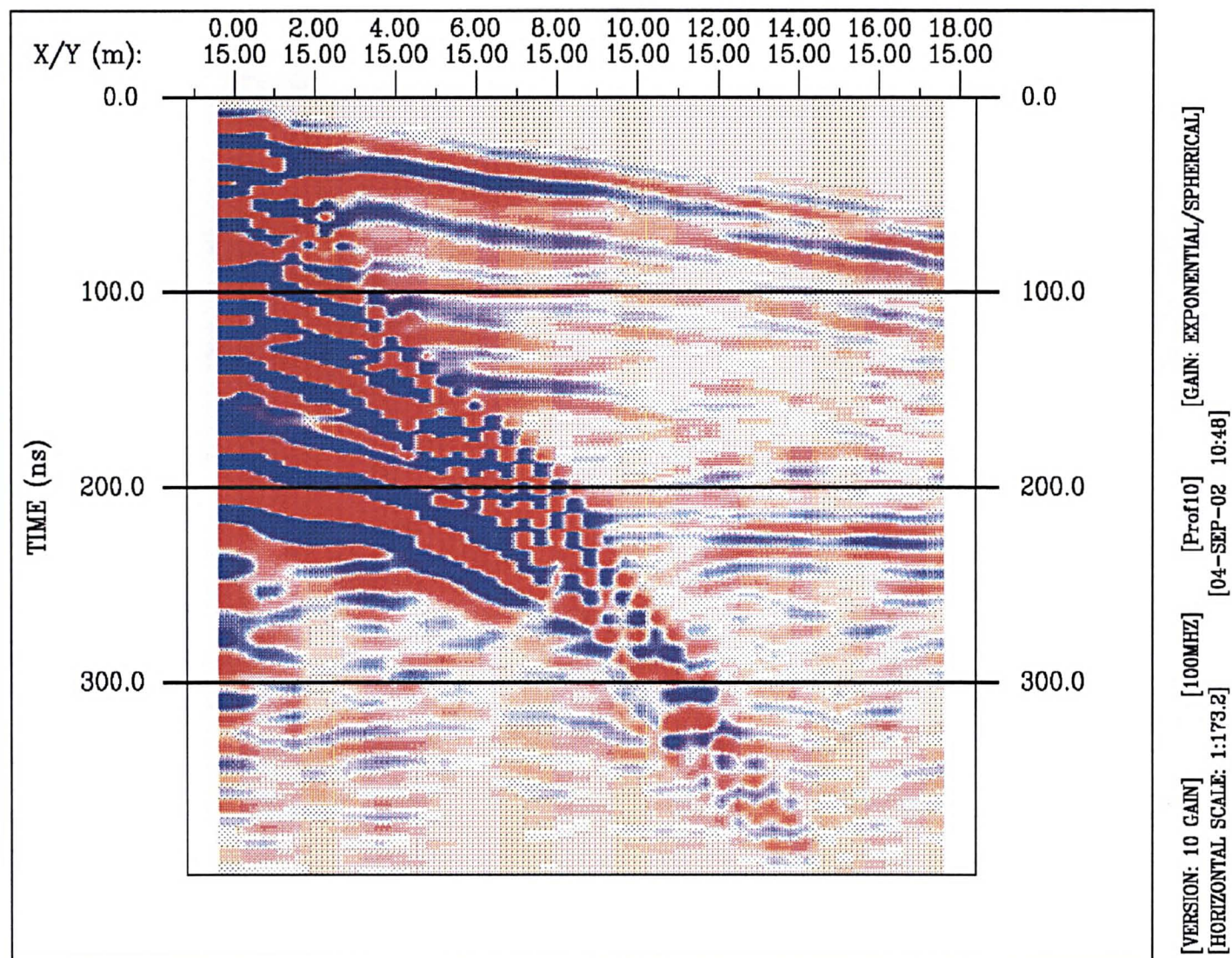


Figura 24d – perfil CMP - posição = 30m no perfil T2

### 6.3 Análises Químicas

Para a determinação da qualidade de solos e águas subterrâneas, foram utilizados os valores orientadores recém editados pela Cetesb – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo, bem como aqueles fornecidos pelas agências ambientais da Holanda e Alemanha (Schianetz, 1999), por já haverem sido implementados a mais tempo, e portanto terem passado por criteriosas revisões.

Cabe frisar que estas planilhas de orientação são divididas em: (I) “valores de referência Cetesb e Lista Alemã” ou “valores de meta Lista Holandesa”, representativos do nível de qualidade para um solo considerado limpo ou a qualidade natural das águas subterrâneas, no caso da Cetesb e Lista Alemã, ou das concentrações abaixo das quais não existe risco tolerável para pessoas, plantas, animais e ecossistema, no caso da Lista Holandesa; (II) “valores de alerta Cetesb”, indicativos de uma possível alteração da qualidade natural dos solos, estabelecido somente para a presença de metais em solos agrícolas, não se aplicando portanto neste caso em especial e, (III) “valores de intervenção Cetesb, Lista Alemã e Lista Holandesa”, indicando o limite de contaminação acima do qual existe risco potencial de efeito deletério sobre a saúde humana, havendo necessidade de uma ação imediata na área, visando a minimização das vias de exposição, como a restrição de acesso de pessoas à área e a suspensão do consumo de água subterrânea. No caso da Cetesb (2002<sub>b</sub>), estes valores de intervenção são diferenciados e sub-divididos para áreas agrícolas, residenciais e industriais, quando da aplicação para solos contaminados exclusivamente. No caso da Lista Alemã, se sub-dividem em valores P-W (para a proteção e utilização de água subterrânea), P-M (para a proteção da saúde humana em áreas contaminadas, sendo classificado em P-M1 para áreas de Jardim de Infância, P-M2 para áreas residenciais e P-M3 para áreas industriais) e P-P (para a proteção do solo e de plantas).

Neste contexto, analisando-se primeiramente os resultados analíticos das amostras de solo SRF 01 a 05, constatamos que os compostos orgânicos aromáticos (BTXE – benzeno, tolueno, xileno e etilbenzeno), ocorrem em concentrações muito baixas. Estes compostos concentram-se preferencialmente no

ar contido nos poros do solo, mas em função da sua mobilidade também podem colocar em risco o solo e em especial a água subterrânea, sendo no entanto facilmente elimináveis biologicamente (Schianetz, 1999).

Com relação ao Benzeno, devido a sua alta mobilidade em comparação aos outros constituintes do grupo BTXE, não foi detectado em nenhum dos poços de monitoramento.

Somente o Tolueno é classificado pela Lista Alemã como acima do valor de referência, ficando os Xilenos e o Etil Benzeno abaixo dos valores de referência, como pode ser observado abaixo (tabela 7), considerando-se os pontos observados de maior concentração.

Tabela 7 – valores orientadores para solos contaminados

	Resultado Analítico	Cetesb		Lista Holandesa		Lista Alemã	
	mg/Kg	referência	intervenção	meta	intervenção	referência	intervenção
Tolueno	0,022 (SRF-03)	0,25	30-40-140*	0,05	130	0,01	9,0
Xilenos (o,m,p)	0,023 (SRF-01)	0,25	3,0-6,0-15*	0,05	25	-	-
Etil Benzeno	0,001 (SRF-01/03)	-	-	0,05	50	-	-

\* valores orientadores para regiões agrícolas, residenciais e industriais respectivamente

Ao avaliarmos as concentrações verificadas nas amostras de água subterrânea ARF 01 a 09, constatamos que os compostos orgânicos aromáticos (BTXE), praticamente não são detectados na maioria das amostras, com exceção das amostras ARF 06 e ARF 08, onde o valor presente do elemento Tolueno (150 µg/L) é muito próximo do valor de intervenção estabelecido pela Cetesb (170 µg/L), muito acima do valor máximo preconizado pela Lista Alemã (50 µg/L); no entanto, muito abaixo do valor determinado pela Lista Holandesa (1000 µg/L), como pode ser observado na tabela 8.

Tabela 8 – valores orientadores para água subterrânea contaminada

	Resultado Analítico	Cetesb		Lista Holandesa		Lista Alemã	
	µg/L	referência	intervenção	meta	intervenção	referência	intervenção
Tolueno	86 (ARF-06)	2,5	170	0,2	1000	ausente	10-50**
	150 (ARF-08)						
Naftaleno	0,53 (ARF-01)	-	100	0,1	70	0,05	2
Fenantreno	0,03 (ARF-01)	-	-	0,02	5	-	-

\*\* valor de intervenção e valor de tolerância, utilizado quando os valores de intervenção não podem ser mantidos por motivos específicos do local ou dispêndio com a remediação excessivamente alto.

Com relação aos elementos Naftelano e \*Fenantreno (\*não relacionado na lista de valores orientadores da Cetesb), ambos ultrapassam os valores meta e de referência das Listas Holandesa e Alemã; no entanto, encontram-se ainda distantes dos valores de intervenção preconizados, em especial pela Cetesb, como no caso do Naftaleno.

Nota-se que as três tabelas orientadoras possuem valores distintos para os diferentes elementos químicos, podendo chegar a serem diferentes em até mesmo 2 ordens de grandeza, como no caso dos valores de intervenção para o Tolueno presentes na Lista Alemã (10 µg/L) e na Lista Holandesa (1000 µg/L). Tais discrepâncias refletem a postura e enfoque da agência ambiental de cada país. Na Alemanha a prioridade é que o solo volte a ser considerado limpo; já no caso da Holanda, a prioridade é a real possibilidade de se realizarem operações de remediação ambiental na área afetada, já que os custos envolvidos são muitas vezes impagáveis. No caso do Brasil, temos valores intermediários, desenvolvidos para a nossa realidade, pois nos diferenciamos pelo clima e tipos de solo, o que resulta em distintas reações de transformação, biodegradação ou persistência de elementos nocivos.



Por fim, ao analisarmos as amostras obtidas no ponto SS-06, oriundas de sondagem (figura 18) e coletadas a 1, 2.0 e 2.5 metros de profundidade, de maneira a se conhecer a presença ou não de contaminantes nas três camadas geológicas diferenciadas, observamos que em todas as amostras obtidas, praticamente todos os elementos componentes do parâmetro PAH (hidrocarbonetos poliaromáticos) encontram-se próximo ou abaixo do limite de detecção, com exceção dos elementos Benzo (b) fluoranteno e Benzo (k) fluoranteno, com resultados de 0,37 e 0,12 mg/Kg respectivamente, detectados na amostra mais superficial, oriunda de 1 metro de profundidade e que corresponde a um solo orgânico-argiloso, iridiscente e de coloração escura.

Tais valores, apesar de não serem preconizados de forma individual em nenhuma das listas orientadoras, ainda estão muito abaixo do valor de referência estabelecido pela Lista Alemã, para a soma de todos os elementos constituintes dos PAH's (em torno de 16 elementos químicos) com exceção do naftaleno, que é de 1,0 mg/Kg.

## **7      Discussão**

Quando do início dos levantamentos geofísicos na área afetada, não se sabia ao certo qual seria o grau do impacto ambiental presente, pois ainda não haviam sido realizadas sondagens de verificação e amostragens químicas representativas da qualidade do solo e das águas subterrâneas, fazendo com que a mancha de óleo, presente atualmente na área de forma superficial e na fotografia aérea do ano de 1999, denotassem um cenário ambientalmente negativo.

Ao se analisar o fato de que a apenas dois anos e meio atrás a área encontrava-se coberta por uma extensa pluma visível de óleo diesel e lubrificantes (figura 14), os alvos buscados a princípio eram anomalias de maior resistividade - apesar do conhecimento prévio da ocorrência na área, de antigas contaminações desde a década de oitenta e que poderiam vir a gerar anomalias que revelassem zonas condutoras, como descrito por Sauck (1997); Atekwana *et al* (2002). A

constatação de uma zona superficial mais resistente, sotoposta por uma zona de baixa resistividade conduziu a uma primeira avaliação das seções modelo de resistividade (figura 21) como realmente favorável a este conceito, fato ainda corroborado pela forma e comportamento da anomalia, que apresentava um espalhamento horizontal partindo de uma fonte pontual, além de uma provável emersão e estreitamento vertical.

Com a realização das sondagens elétricas verticais, obteve-se uma melhor definição estratigráfica. Através delas observou-se uma camada de alta resistividade entre as profundidades de 0,5 e 2 metros, que poderia ser inicialmente correlacionada com uma pluma contaminante de natureza resistiva. Abaixo desta, observou-se uma camada de muito menor resistividade.

Durante os levantamentos dos perfis GPR, foi possível a visualização com detalhes das intercalações de camadas próximas da superfície, suas formas e feições predominantes, além da existência de uma pluma condutora (perfis transversais), coerente com a localização da atual mancha de óleo visível em superfície.

Com a realização das amostragens químicas e de sondagens de verificação, obteve-se um acurado modelo geo-ambiental, que reflete uma área com uma sucessão de camadas compostas essencialmente de material orgânico, arenoso e argiloso, com contaminações abaixo dos níveis permitidos ou inexistentes em todos os parâmetros analisados (BTEX e PAH's). Isto é consequência de um ambiente altamente dinâmico, onde a atuação bacteriológica e o aporte de nutrientes foi em grande parte responsável pela digestão da carga de poluentes presentes. Tal fato se baseia nas contagens de bactérias heterotróficas, bolores e leveduras realizadas em diversas amostras de solo e de água subterrânea (ver tabelas 4, 5 e 6), onde se observa uma nítida correlação entre o espalhamento da pluma, concentração de contaminantes e maior ou menor presença de microorganismos biodegradantes.

Neste sentido é possível observar que dentre as análises da qualidade da água obtidas nos diversos poços de monitoramento instalados, a amostra do poço PM-09 (ARF 09), localizado no meio da mancha de óleo visível, é a que apresenta o menor número de bactérias, o que poderia indicar um ambiente sem produtos a

serem degradados, o que é confirmado pela não detecção de nenhum dos elementos chamados “BTXE”. Em contrapartida, a amostra de solo do mesmo ponto (SRF-05), apesar da baixa concentração do elemento Tolueno e não detecção de outros elementos orgânicos, como o Benzeno, Etilbenzeno e Xilenos, demonstra a maior concentração de hidrocarbonetos totais de petróleo (TPH = 160 mg/Kg) e bactérias em concentrações intermediárias. Tal variação é concordante com as características do principal elemento químico anteriormente lançado no ambiente, classificado como PAH (hidrocarboneto poliaromático) e comercialmente chamado de diesel. O mesmo possui pequena mobilidade e pequenas concentrações de elementos BTXE, o que explicaria portanto a origem da grande concentração de TPH's dentre os pontos amostrados.

Esta alta concentração ainda se mantém devido à dificuldade de aporte de oxigênio (áreas com grande concentração de hidrocarbonetos são internamente anóxicas) e com impedimento de proliferação microbiológica (bactérias heterotróficas) pela dificuldade de acesso de nutrientes via água subterrânea e superficial ao interior da massa impactada, pois este ponto encontra-se em cota levemente superior à área como um todo, o que diminui a presença de água. Além disto, a camada com óleo possui pequena espessura (aprox. 40 cm) e encontra-se em parte selada em sua base por uma camada de argila cinza extremamente plástica e portanto com pequena condutividade hidráulica.

Considerando que o mapa potenciométrico (figura 16) denota um movimento da água subterrânea no sentido nordeste, pode-se observar que, na ordem crescente, os poços onde as amostras refletem acréscimos graduais da presença de bactérias podem ser divididos em três grupos: (I) PM's-02 e 07; (II) PM's-03, 04 e 05 e, (III) PM's-06 e 08, sendo este último grupo, o único onde as amostras revelaram a presença do elemento químico Tolueno (em valores próximos ao limite permitido pela Cetesb). A presença do Tolueno em pontos afastados da área de lançamento se traduz pela sua maior mobilidade e solubilidade, e as altas concentrações de bactérias como decorrência da presença de elementos orgânicos a serem ainda biodegradados.

Partindo da premissa de que a área não está contaminada acima dos padrões legais utilizados no Brasil, tomando-se por base a “tabela de valores orientadores da Cetesb”, os levantamentos geofísicos contribuíram para a identificação e detalhamento das diversas feições e camadas estratigráficas presentes, além da detecção de plumas condutivas relacionadas às áreas onde a atuação microbiológica já havia degradado os hidrocarbonetos contaminantes outrora presentes em grandes concentrações.

Com relação aos métodos de eletrorresistividade, as SEV's demonstraram neste estudo melhor aptidão à individualização de camadas litoestratigráficas com relação ao caminhamento elétrico, apesar de que, em muitos casos, não possuíram resolução suficiente para separar pequenas feições de natureza elétrica contrastante. Após verificação por sondagem, verificou-se que a segunda camada detectada, de natureza mais resistente, tratava-se de espesso e homogêneo pacote composto essencialmente por material orgânico insaturado, não sendo possível verificar de forma individualizada a pluma contaminante detectada no Geo-radar.

Quanto ao caminhamento elétrico, apesar da utilização de espaçamento entre eletrodos de 10 e 5 metros, de maneira a visualizar-se o embasamento cristalino e as porções mais superficiais do perfil respectivamente, o mesmo acabou por englobar num único pacote de natureza resistiva, as camadas superficiais compostas por material orgânico e argila - esta última de natureza reconhecidamente condutora - em conjunto com as lentes compostas por areia saturada, não permitindo portanto a individualização de feições em maior detalhe.

Se houvesse uma correlação clara da contaminação com as respostas geofísicas, recomendando mais ensaios geofísicos, provavelmente um espaçamento ainda menor, por exemplo, de 2,5 metros entre eletrodos, poderia individualizar um maior número de camadas nos primeiros 3 ou 4 metros da coluna geoelétrica. A utilização de um sistema multi-eletrodos, com levantamento realmente 3D é então o mais recomendado arranjo de eletrodos para situações como a do presente estudo.

Os levantamentos realizados com o Geo-radar demonstraram a melhor relação entre resolução, individualização de feições e profundidade de penetração, em especial quando se utilizou o par de antenas de 100 Mhz não blindadas, como já

descrito em capítulos anteriores. Neles são facilmente reconhecíveis as camadas superficiais de natureza condutora, presentes até aproximadamente 40 cm de profundidade, relacionadas a concentrações de óleo em processo de biodegradação (visível em superfície), como no caso do perfil 2; quando existe uma camada de mesma espessura composta por argila, perfil 3 ou quando a camada insaturada de material orgânico parte desde superfície, como nos perfis restantes. As demais camadas em sequência também são nitidamente identificadas, com maior ou menor grau de reflexão, em especial quando estão presentes em profundidades de até 7 ou 8 metros.

Apesar das lentes e/ou camadas arenosas estarem preenchidas por água, sua reflexão foi muito intensa, o que pode ter sido auxiliado pela grande concentração de óxido de ferro neste ambiente - fenômeno característico dos bolsões arenosos saturados desta região - aumentado ainda mais pelas condições redutoras resultantes da degradação microbiológica. Segundo Van Dam *et al* (2002), este fenômeno pode levar a influenciar a configuração das reflexões Geo-radar, pela variação da permeabilidade magnética e permitividade dielétrica relativa, resultando na diminuição da velocidade da onda eletromagnética nos sedimentos.

Na comparação das seções de caminamento elétrico com os perfis GPR (figuras 25a, 25b, 25c, 25d e 25e), fica claro que ambos os métodos possuem uma correlação direta. No entanto, com o espaçamento entre eletrodos utilizado não foi possível um detalhamento de feições de pequenas dimensões, mesmo que de natureza tabular e grande extensão horizontal, reforçando ainda mais a qualidade da obtenção de respostas através do Geo-radar, em situações como a do presente estudo.

Por fim, ao se avaliar o mapa de resistividade em camadas (figura 26), obtido a partir da interpolação por níveis das diversas seções modelo de resistividade, nota-se uma grande dificuldade em distinguir e classificar as feições de forma individualizada, de maneira a se diferenciar a pluma condutora em si, não demonstrando portanto ser de grande eficácia neste caso específico, no auxílio às operações de monitoramento ambiental no local.

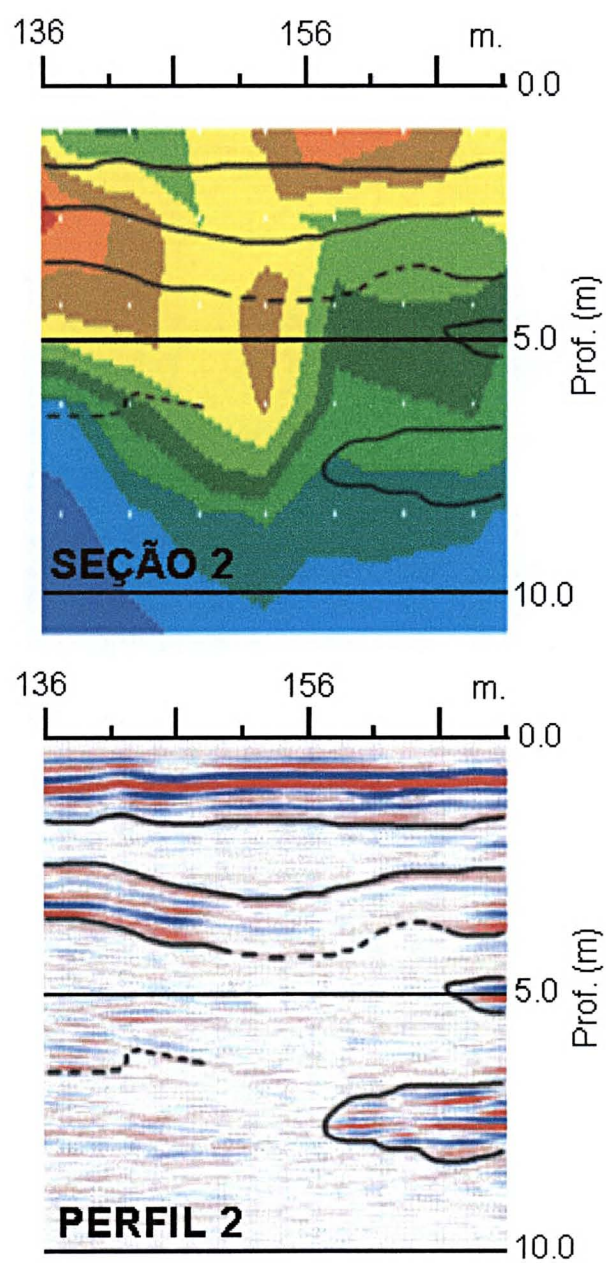


Figura 25a - comparação da seção de caminhamento elétrico e perfil GPR - linha 2



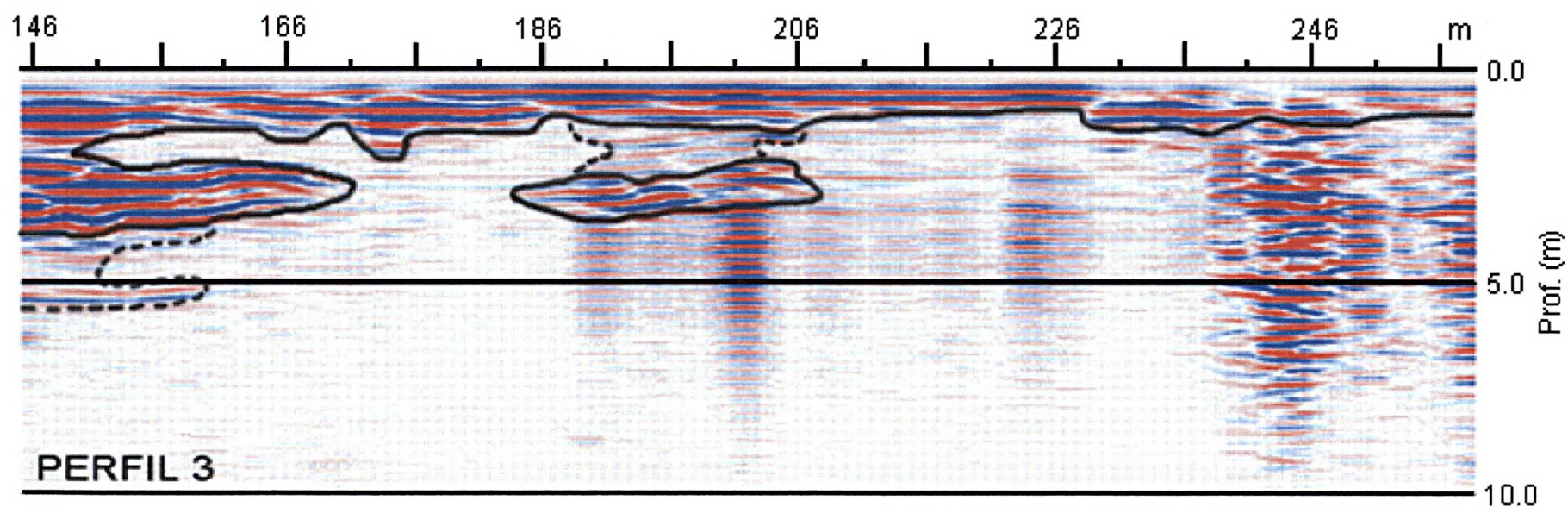
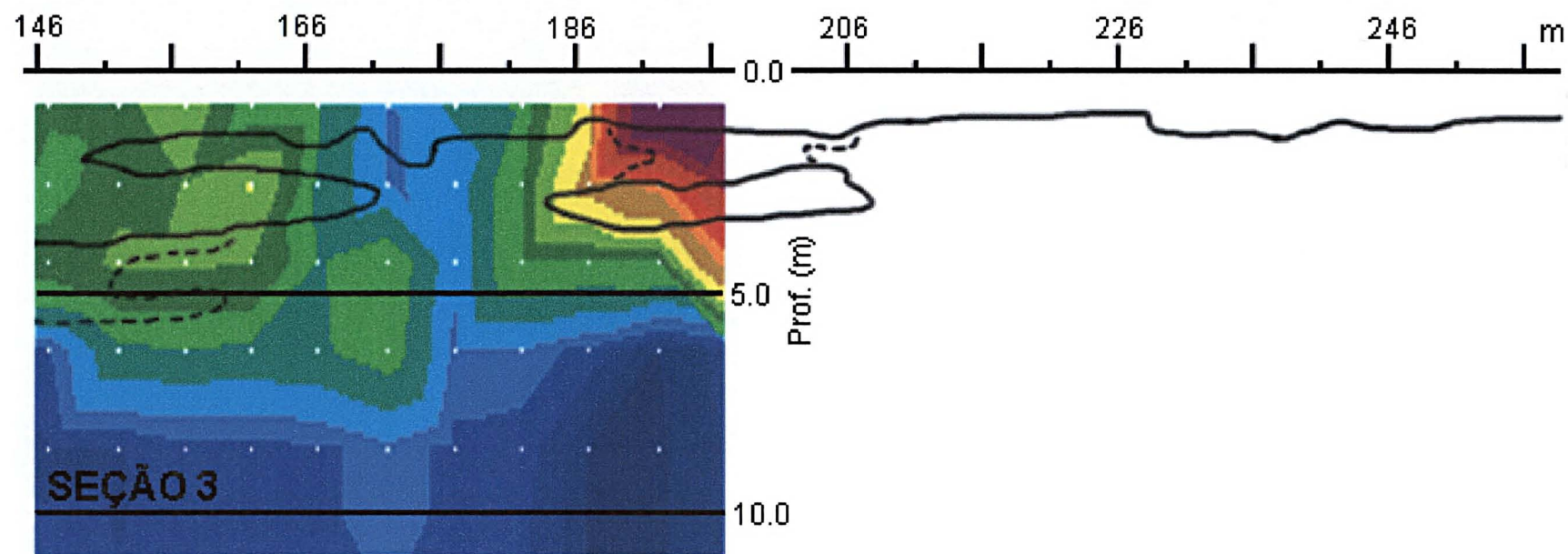


Figura 25b - comparação da seção elétrica e perfil GPR - linha 3



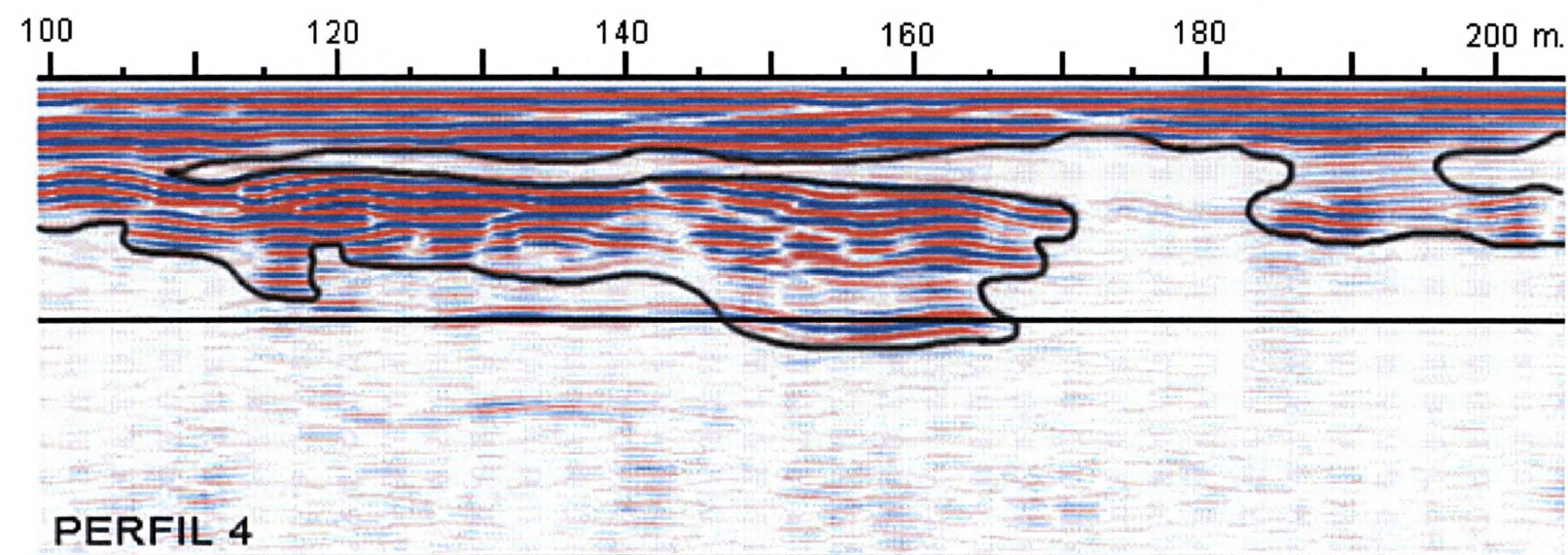
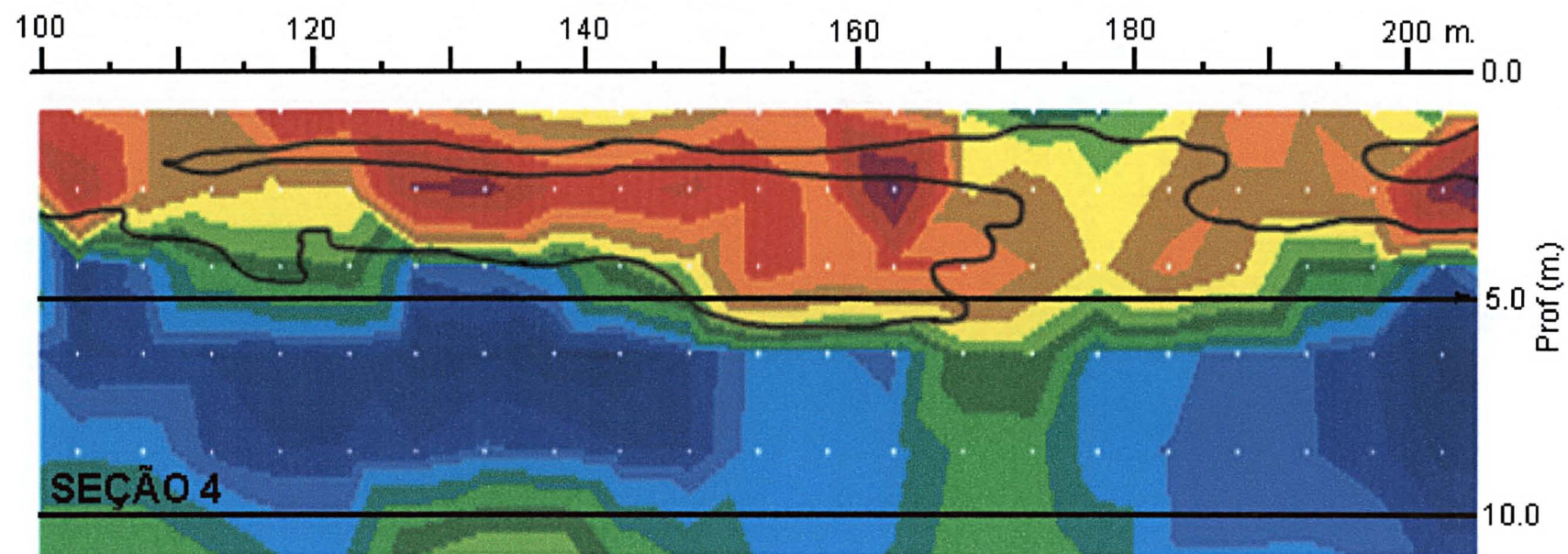


Figura 5 - comparação da seção de caminhamento elétrico e perfil GPR - linha 4



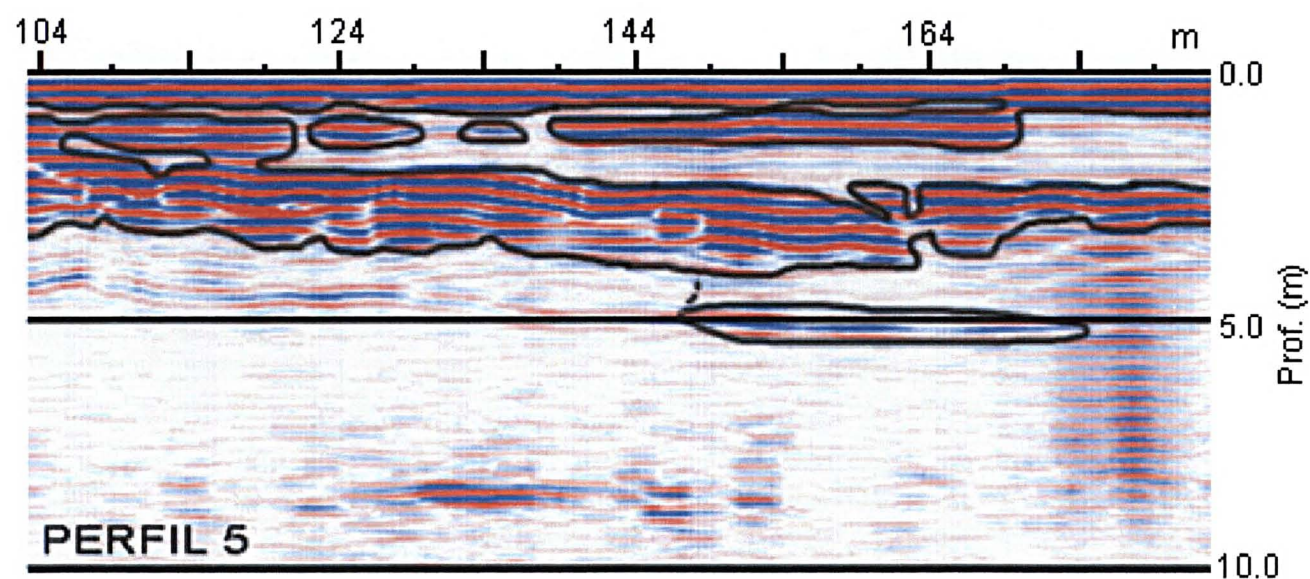
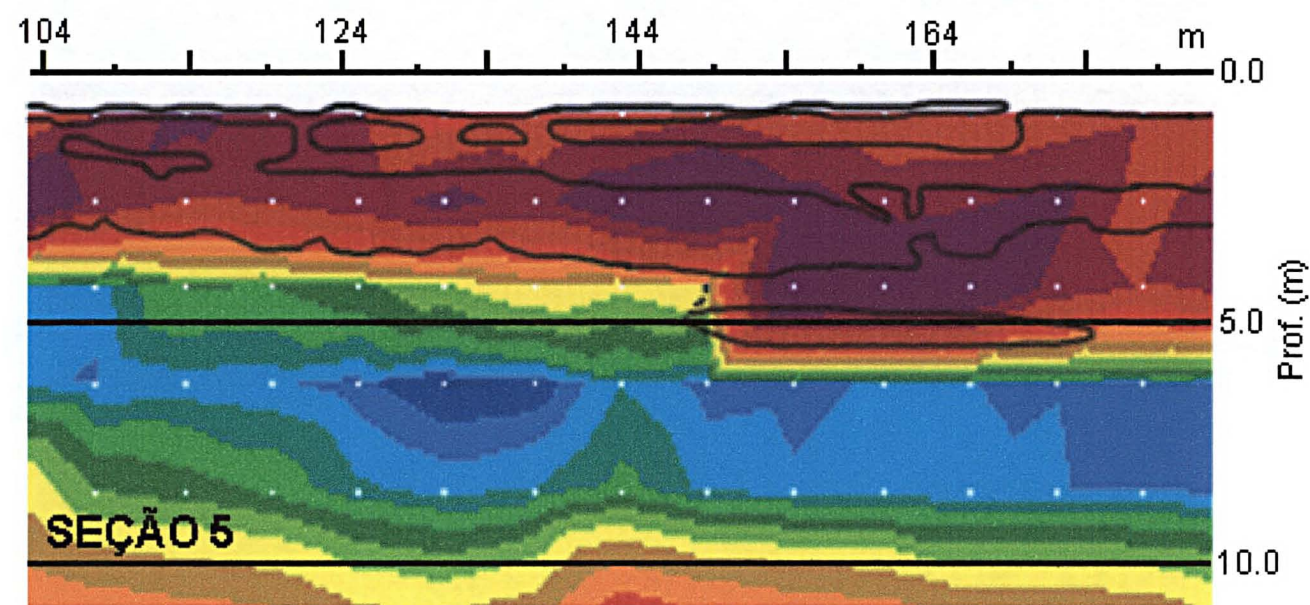


Figura 25d- comparação da seção elétrica e perfil GPR - linha 5

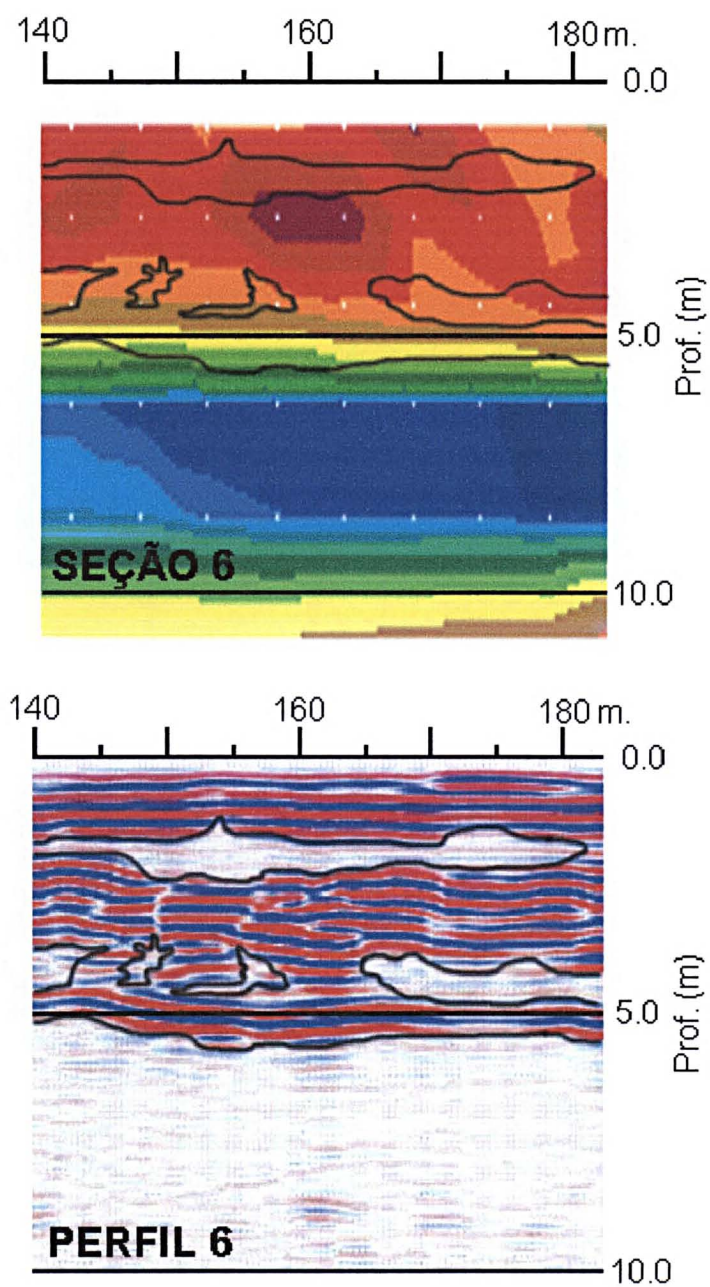


Figura 25e - comparação da seção elétrica e perfil GPR - linha 6

## 8 Considerações finais

1. A técnica de caminhamento elétrico necessita de um pequeno espaçamento entre eletrodos (em torno de 2,0 metros) para poder diferenciar feições menores e de características elétricas distintas nos primeiros 3 a 4 metros de profundidade;
2. Espaçamentos maiores entre eletrodos, como utilizado no presente estudo (10,0 metros) são de grande utilidade na delimitação de feições marcantes em profundidade, como o embasamento cristalino;
3. A técnica de sondagem elétrica vertical – SEV, por ter sido executada com espaçamento de muito maior detalhe do que o utilizado no caminhamento elétrico, promove um melhor detalhamento da coluna geoeletrica, apesar de assumir um modelo de camadas contínuas, o que não condiz com a realidade geológica na área de estudos. A SEV possui como desvantagem o fato de sua visualização ser exclusivamente pontual, além de muitas vezes englobar numa única camada, feições com características elétricas distintas;
4. De todos os métodos utilizados, o GPR (Geo-radar) foi o que apresentou a melhor relação entre resolução e individualização de feições nos primeiros 5 a 6 metros, em especial quando se utilizou o par de antenas de 100 Mhz não blindadas;
5. A utilização de antenas GPR blindadas acabou inviabilizando a captura dos sinais refletidos em locais com maior concentração de água e argilas;
6. Condições redutoras decorrentes da degradação microbiológica de hidrocarbonetos são causadoras do aumento da solubilidade do óxido de ferro;
7. A ocorrência de óxido de ferro em grandes concentrações na água subterrânea presente nas lentes de areia, como descrito nas bibliografias que versam sobre esta formação geológica, pode

aumentar o poder refletivo da onda GPR, diminuindo sua velocidade nos sedimentos, pela variação da permeabilidade magnética e permissividade dielétrica relativa;

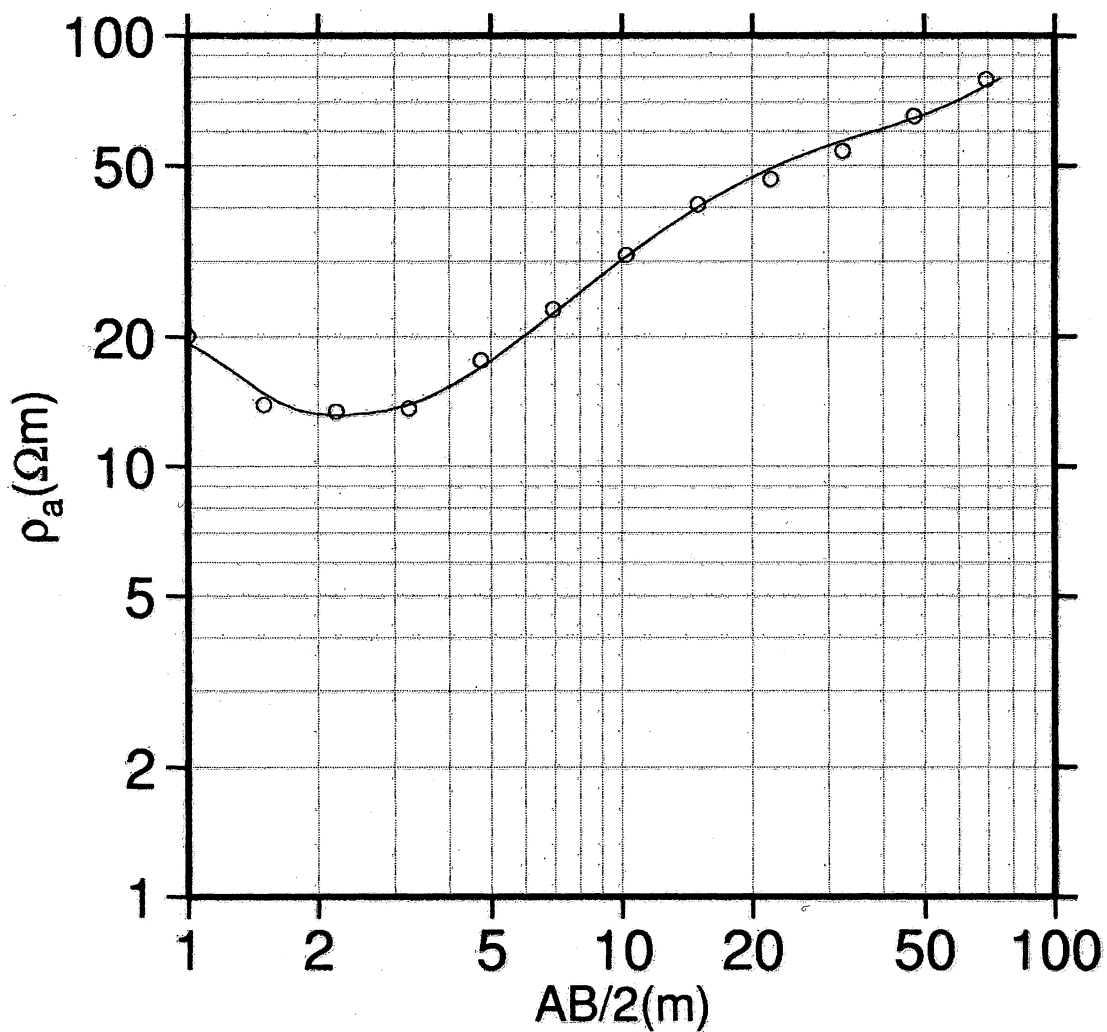
8. Plumas condutoras, provenientes de áreas com intensa atividade microbiológica, podem ser geradas em curtos períodos de tempo, em especial quando sob condições favoráveis, como intenso aporte de nutrientes, maior regime de chuvas e cobertura vegetal. Neste estudo em especial, a mesma foi gerada em aproximadamente 2 a 3 anos;
9. A feição condutora superficial presente nas seções 1 e 2 de caminhamento elétrico poderia ser correlacionada à presença da pluma condutora ou a argilas superficiais, sendo a mesma englobada em meio a uma anomalia resistiva nas seções seguintes, provavelmente referente a pacotes arenosos, como pode ser verificado via sondagem a trado na seção 1;
10. A técnica de sondagem elétrica vertical não foi capaz de individualizar a pluma condutora da camada orgânica superficial e das argilas subjacentes;
11. O GPR foi o único método geofísico capaz de melhor discriminar a pluma condutora em sub-superfície, através de uma nítida feição de espalhamento nos perfis transversais, com início na área afetada pela mancha de óleo visível em superfície;
12. Apesar do GPR distinguir a pluma condutora em sua porção inicial, o mesmo não foi capaz de separá-la das argilas condutoras subjacentes presentes na área, sendo portanto difícil sua delimitação vertical;
13. Quando comparados os métodos GPR e de caminhamento elétrico, é nítida a sua correlação; no entanto o espaçamento entre eletrodos de 5 metros ou mais, não permite um detalhamento maior de feições de pequenas dimensões, mesmo que de natureza tabular e grande extensão horizontal;

14. A presença de bactérias heterotróficas em valores muito superiores ao restante da área, nas duas únicas amostras (ARF 06 e 09) de água subterrânea onde está presente o elemento contaminante Tolueno, condiz com a afirmação de que a alta concentração de microorganismos é decorrente da presença de elementos a serem ainda biodegradados;
15. A análise química das três feições marcantes detectadas via sondagem no perfil 5 (solo orgânico insaturado; argila de cor escura com leve iridiscência e areia saturada) relata a pequena ou ausente concentração de poluentes na área estudada;
16. A borra de óleo visível em superfície possui apenas 40 cm de espessura e é suportada por uma camada de argila de coloração cinza extremamente plástica, portanto de baixa condutividade hidráulica;
17. Abaixo da camada argilosa descrita acima ocorre um espesso pacote de material orgânico no qual existe a presença de forte odor de óleo e iridiscência em sua porção basal (0,80 m) até o limite máximo alcançado pelo trado (1,50 m), sendo que o lençol freático encontra-se a 1,25 metros;
18. Este espesso pacote superficial de material orgânico é suportado por uma camada argilosa de coloração escura com leve iridiscência (espessura aprox. de 30 cm), seguida de uma camada de argila extremamente plástica e de coloração castanho claro (espessura aprox. de 20 cm), que está por sua vez sobreposta ao pacote arenoso, isolando-o, conforme verificado na sondagem realizada na posição 153 metros do perfil GPR 5;
19. Nos perfis transversais GPR é possível visualizar o espalhamento vertical da pluma condutora, cruzando a lente de areia, que ainda demonstra uma leve reflexão (figura 21a - perfil transversal 2), sem entretanto nela penetrar de forma intensa, devido em especial ao pequeno gradiente hidráulico na área em questão.

## **ANEXO I**

### **SONDAGENS ELÉTRICAS VERTICAIS**





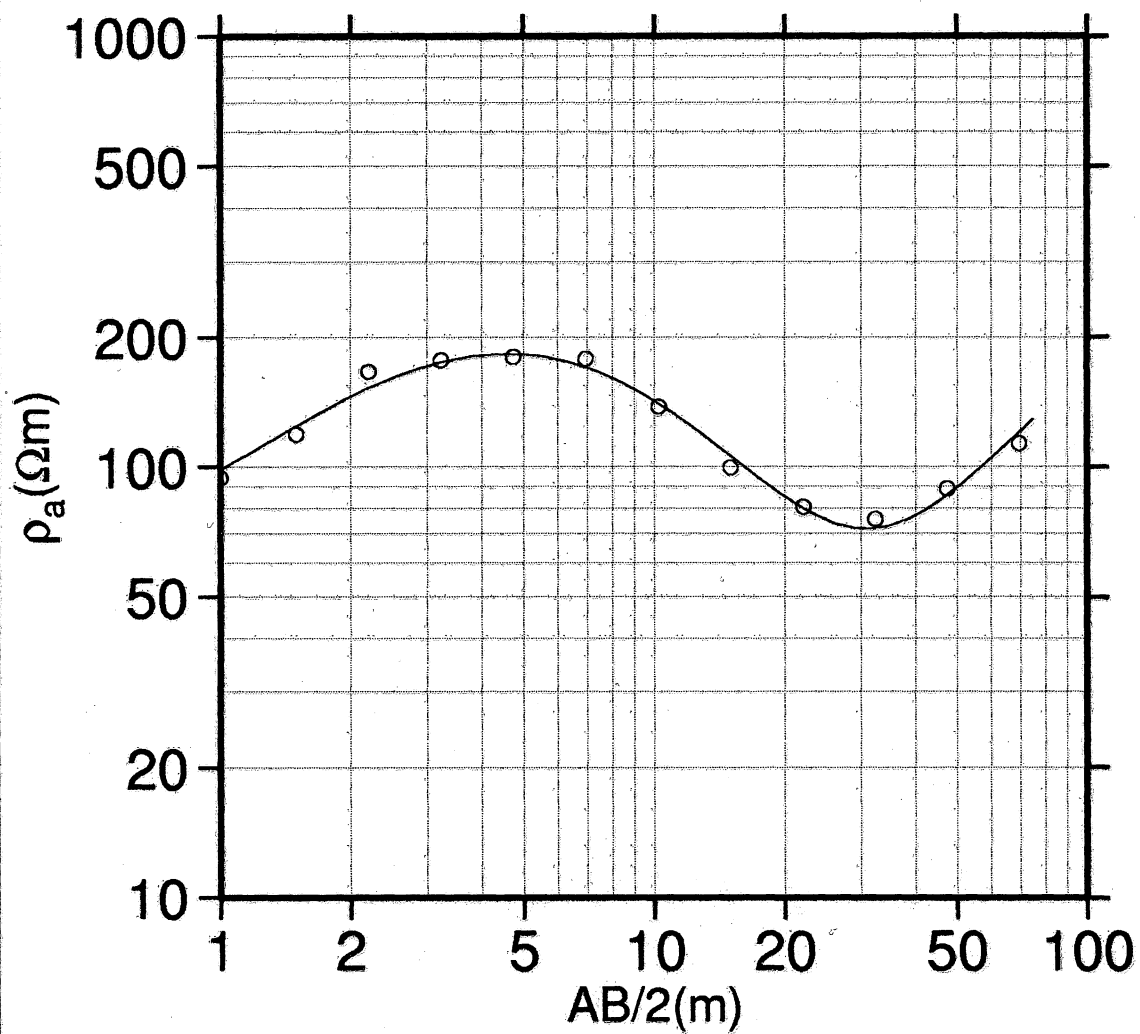
**MODELO DE 5 CAMADAS**

Camada	Res(Ωm)	Espessura(m)	Prof.(m)
1	37	0,4	0
2	11	2,9	0,4
3	466	2,8	3,3
4	15	10,1	6,1
5	2030		16,2

Circulos: valores medidos

Curva: produzida pelo modelo

RFFSA - SEV1



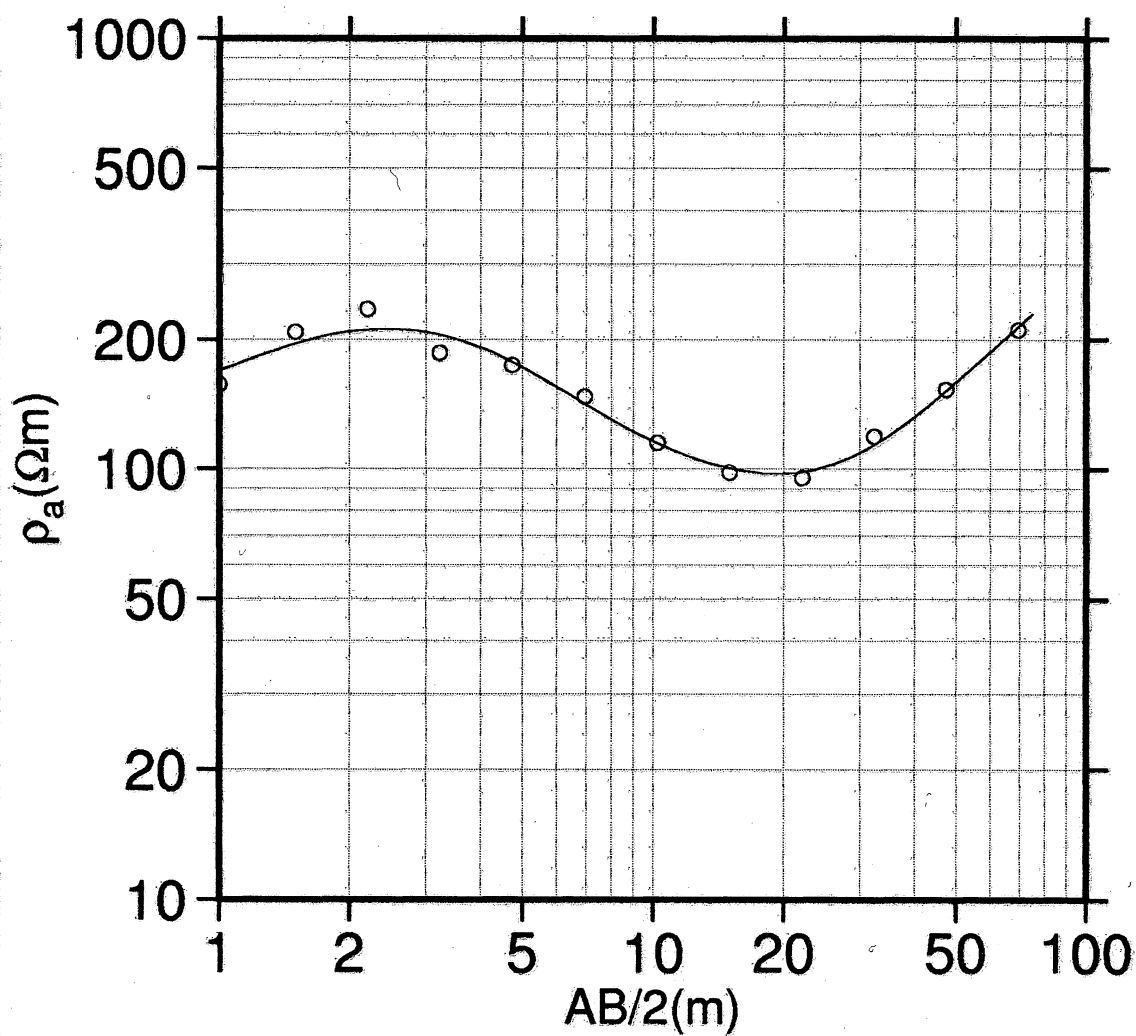
#### MODELO DE 6 CAMADAS

Camada	Res( $\Omega m$ )	Espessura(m)	Prof.(m)
1	64	0,5	0
2	324	1,7	0,5
3	121	3,3	2,2
4	72	8,3	5,5
5	15	5,5	13,8
6	1999		19,3

Circulos: valores medidos  
Curva: produzida pelo modelo

RFFSA - SEV2





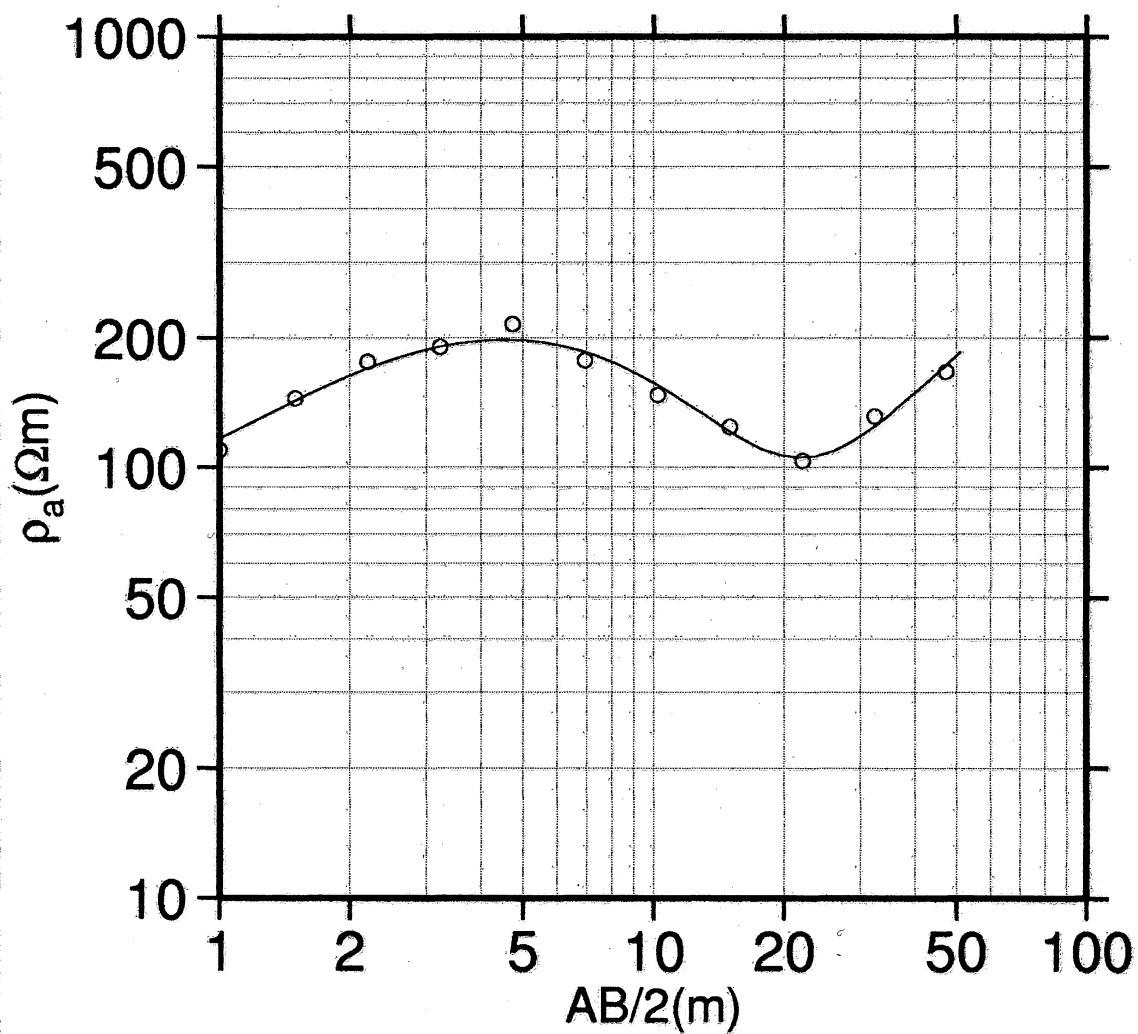
#### MODELO DE 6 CAMADAS

Camada	Res( $\Omega m$ )	Espessura(m)	Prof.(m)
1	108	0,4	0
2	320(fixa)	1,3	0,4
3	102	3,6	1,7
4	90	7,6	5,3
5	22	3,6	12,9
6	2086		16,5

Circulos: valores medidos

Curva: produzida pelo modelo

RFFSA - SEV3

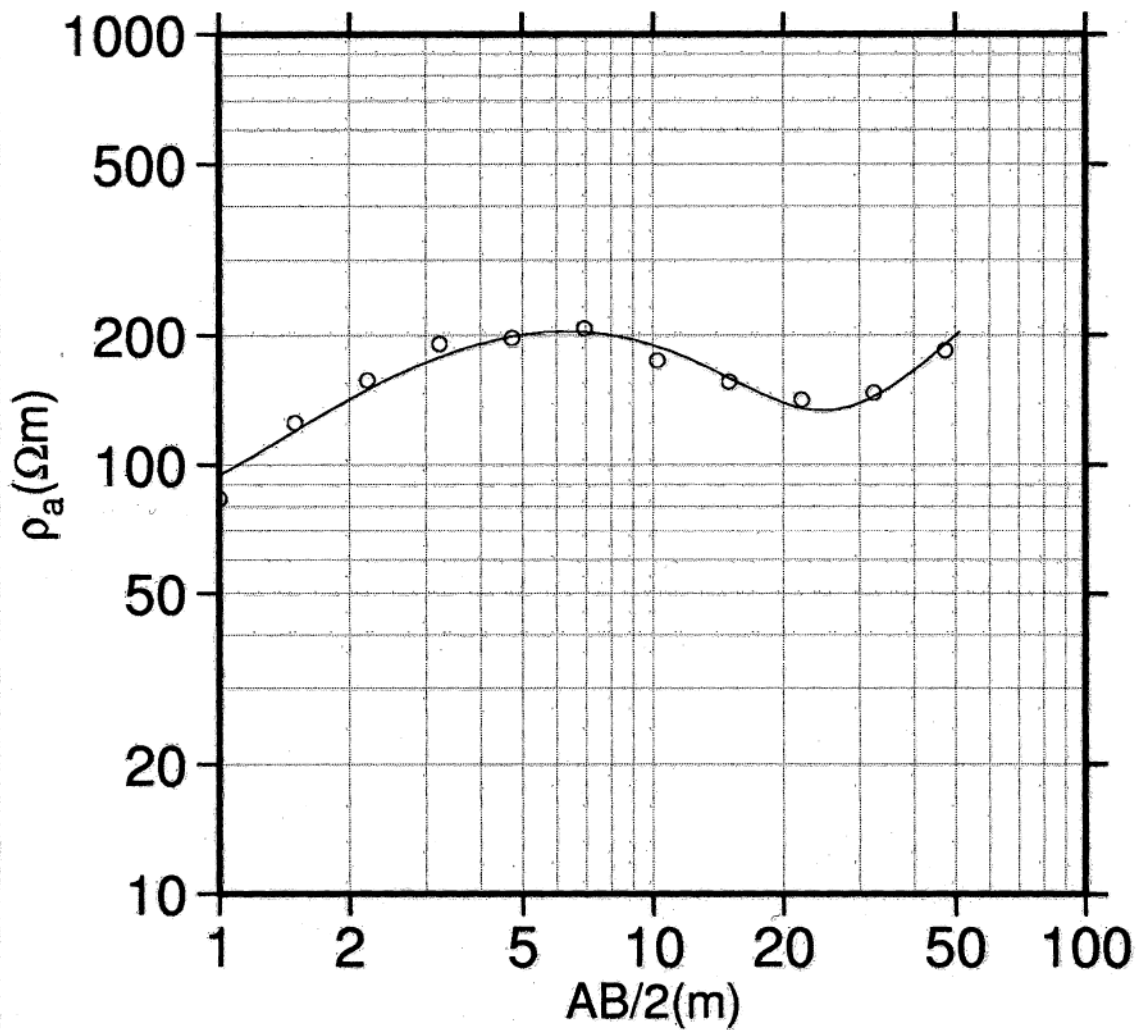


#### MODELO DE 5 CAMADAS

Camada	Res(Ωm)	Espessura(m)	Prof.(m)
1	78	0,5	0
2	284	1,9	0,5
3	160	4,4	2,4
4	28	5,7	6,8
5	2049		12,5

Circulos: valores medidos  
Curva: produzida pelo modelo

RFFSA - SEV4

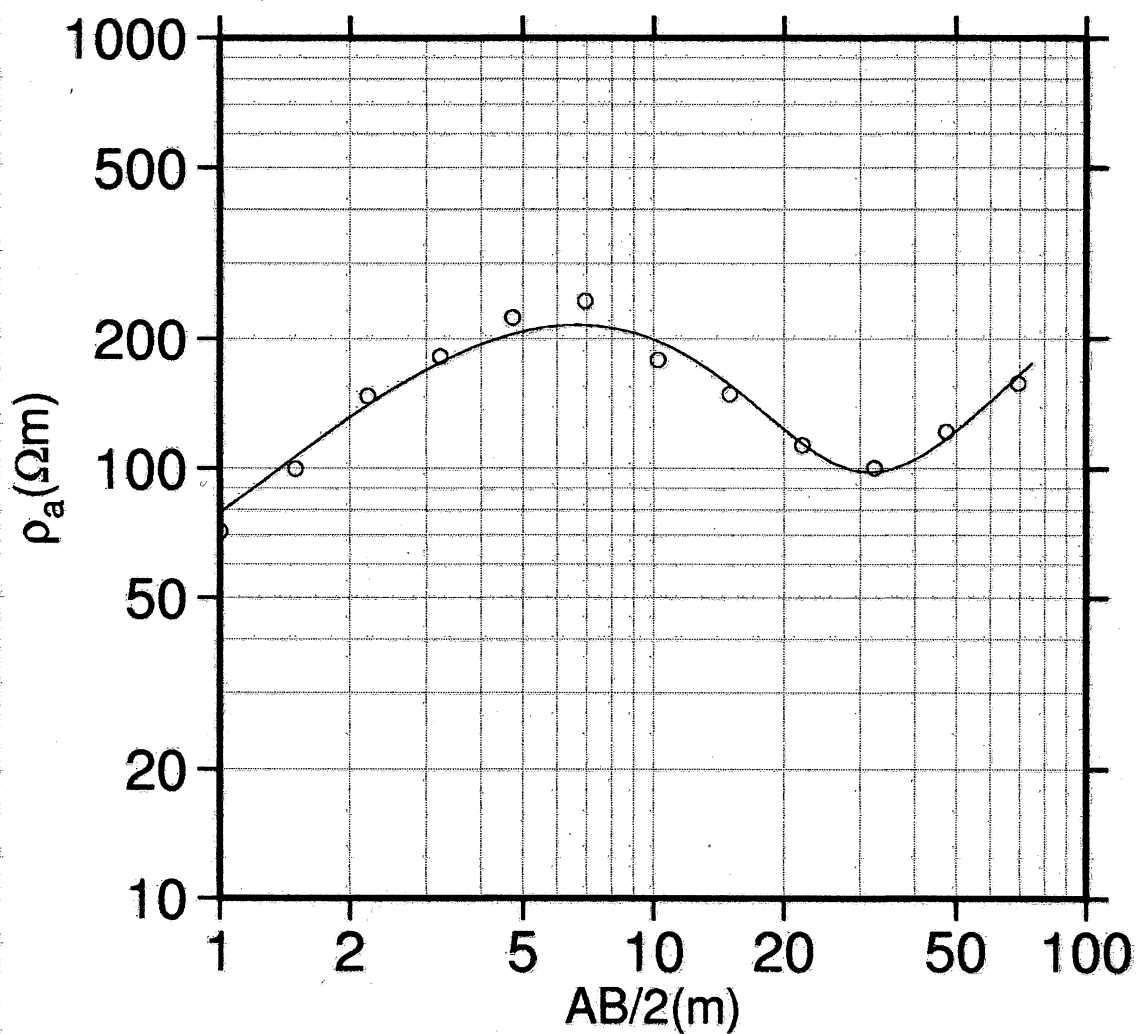


MODELO DE 5 CAMADAS

Camada	Res(Ωm)	Espessura(m)	Prof.(m)
1	62	0,5	0
2	309	2,2	0,5
3	186	5,3	2,7
4	30	5,4	8,0
5	2057		13,4

Circulos: valores medidos  
Curva: produzida pelo modelo

RFFSA - SEV6



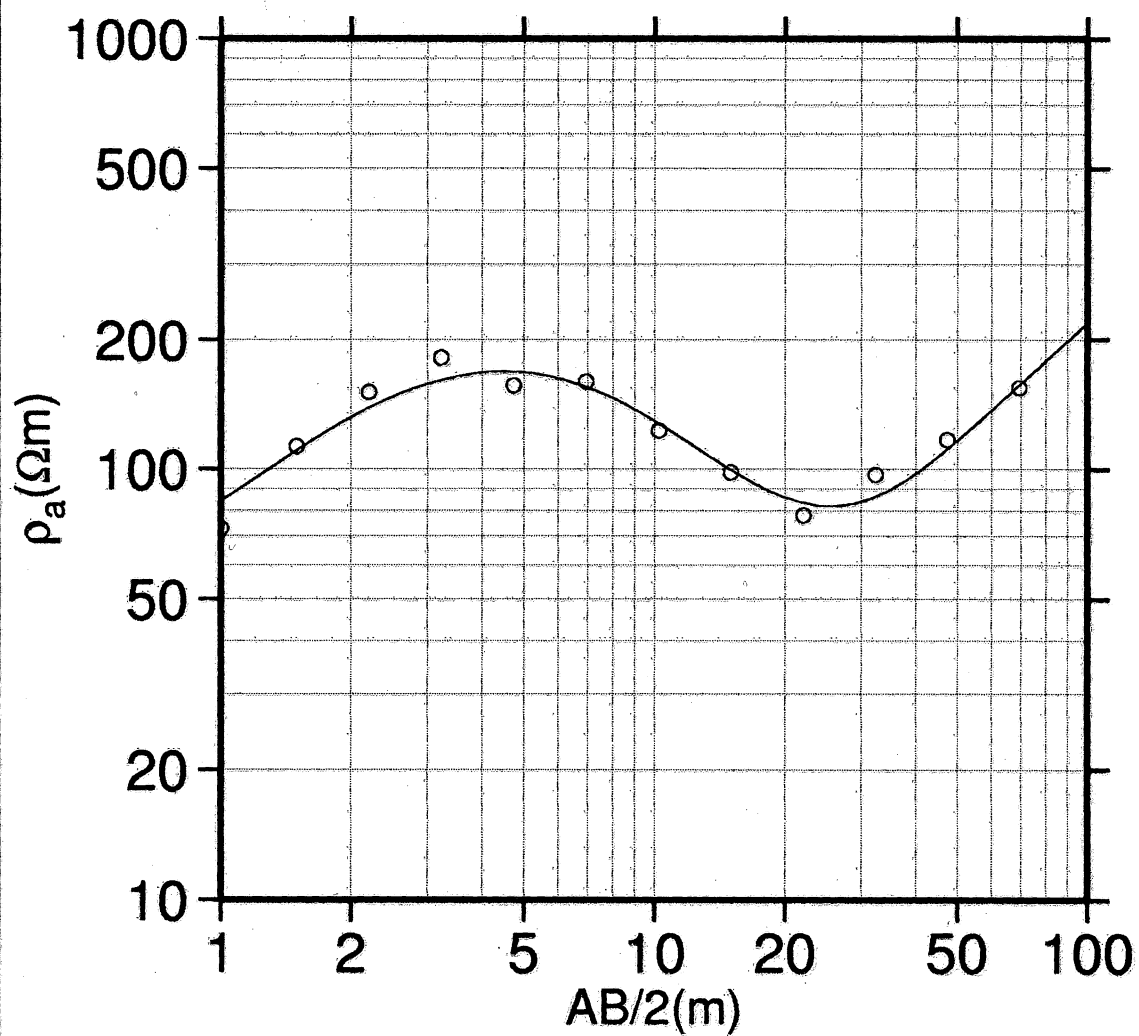
**MODELO DE 6 CAMADAS**

Camada	Res( $\Omega m$ )	Espessura(m)	Prof.(m)
1	43	0,5	0
2	492	1,9	0,5
3	154	3,3	2,4
4	75	7,2	5,7
5	18	4,5	12,9
6	2048		17,4

Circulos: valores medidos

Curva: produzida pelo modelo

RFFSA - SEV7



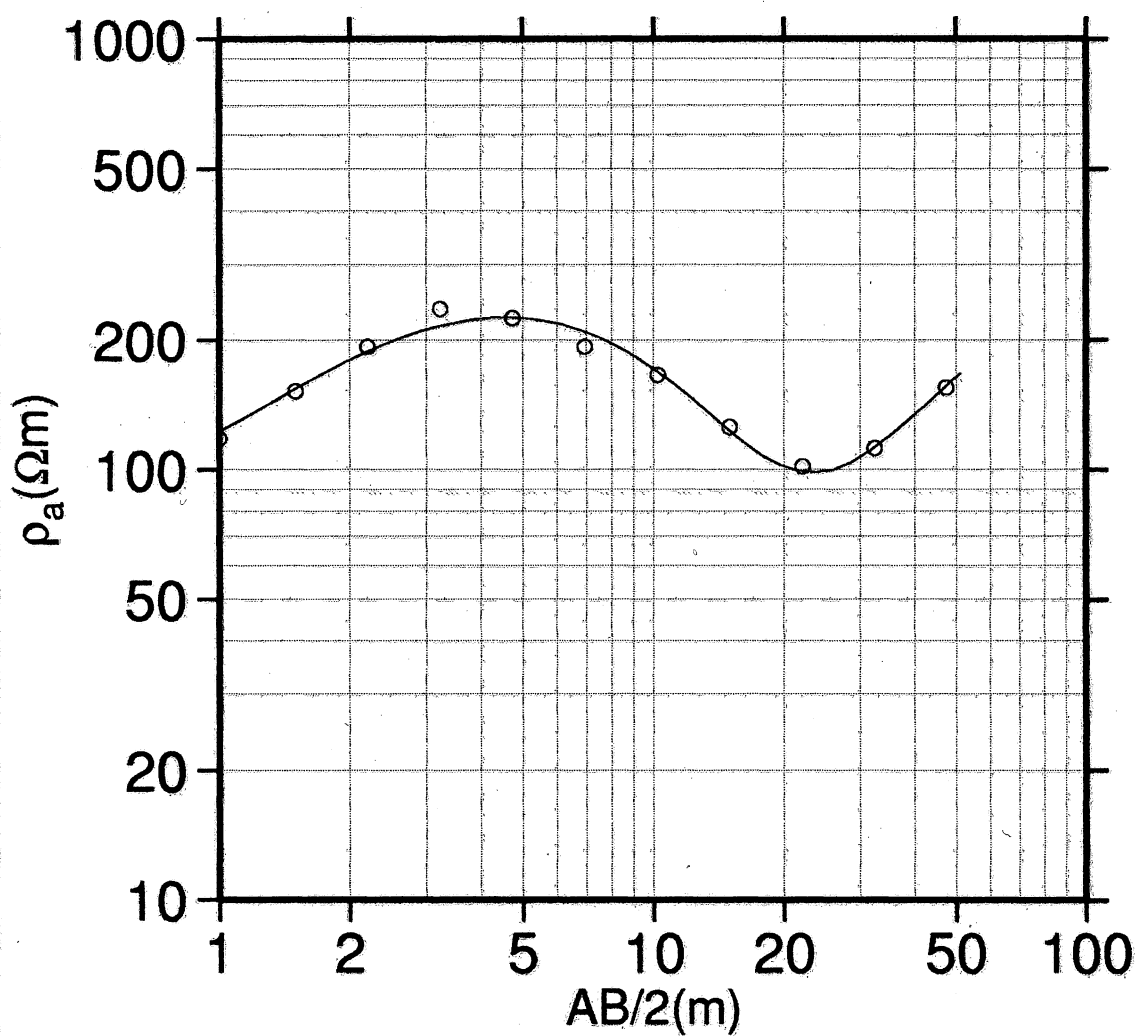
#### MODELO DE 6 CAMADAS

Camada	Res( $\Omega$ m)	Espessura(m)	Prof.(m)
1	48	0,5	0
2	490	1,0	0,5
3	97	3,3	1,5
4	74	7,7	4,8
5	18	4,5	12,5
6	2012		17,0

Circulos: valores medidos

Curva: produzida pelo modelo

RFFSA - SEV8



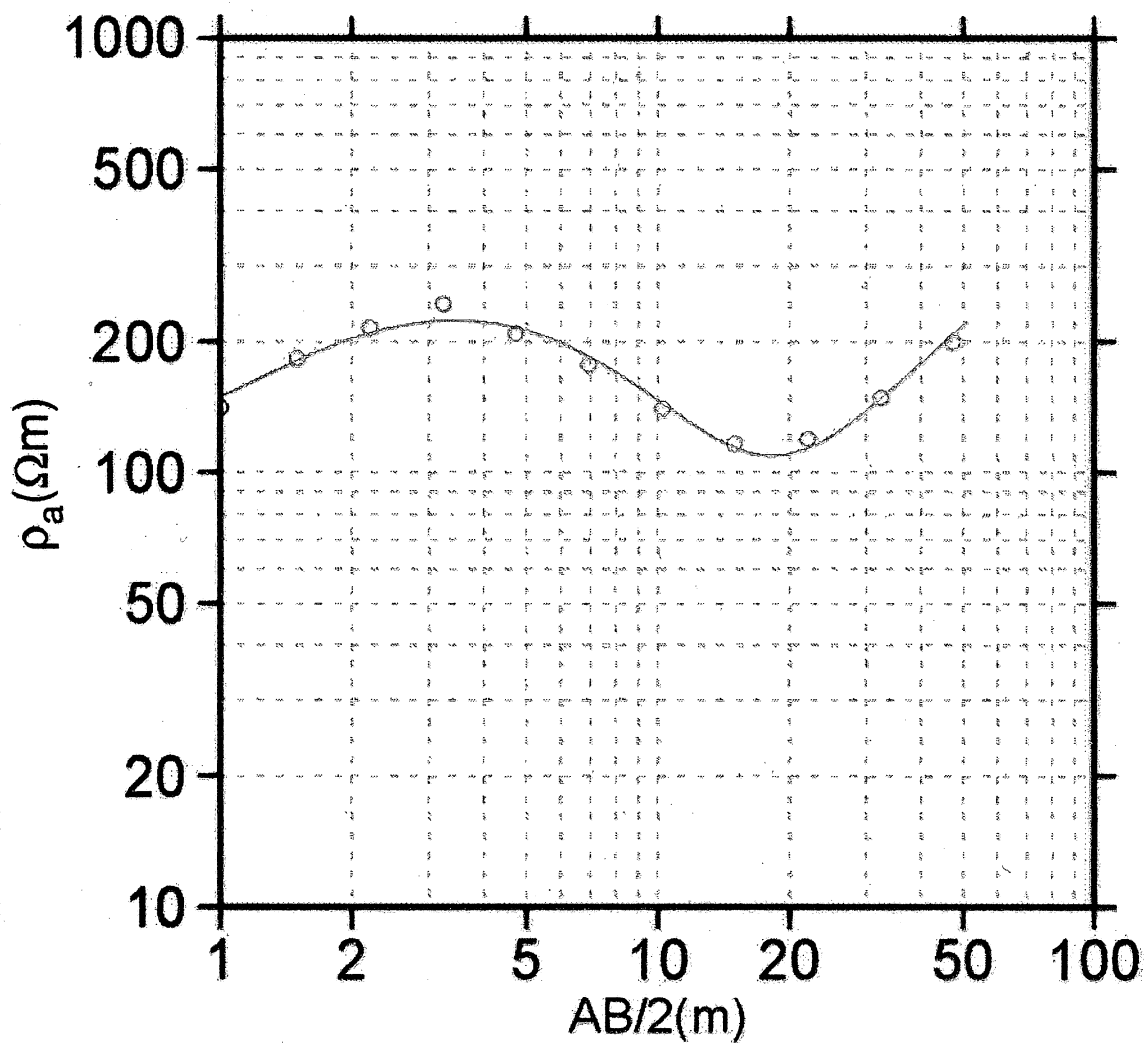
#### MODELO DE 5 CAMADAS

Camada	Res(Ωm)	Espessura(m)	Prof.(m)
1	78	0,5	0
2	390	1,7	0,5
3	164	4,1	2,2
4	33	8,1	6,3
5	2030		14,4

Circulos: valores medidos

Curva: produzida pelo modelo

RFFSA - SEV9



# MODELO DE 5 CAMADAS

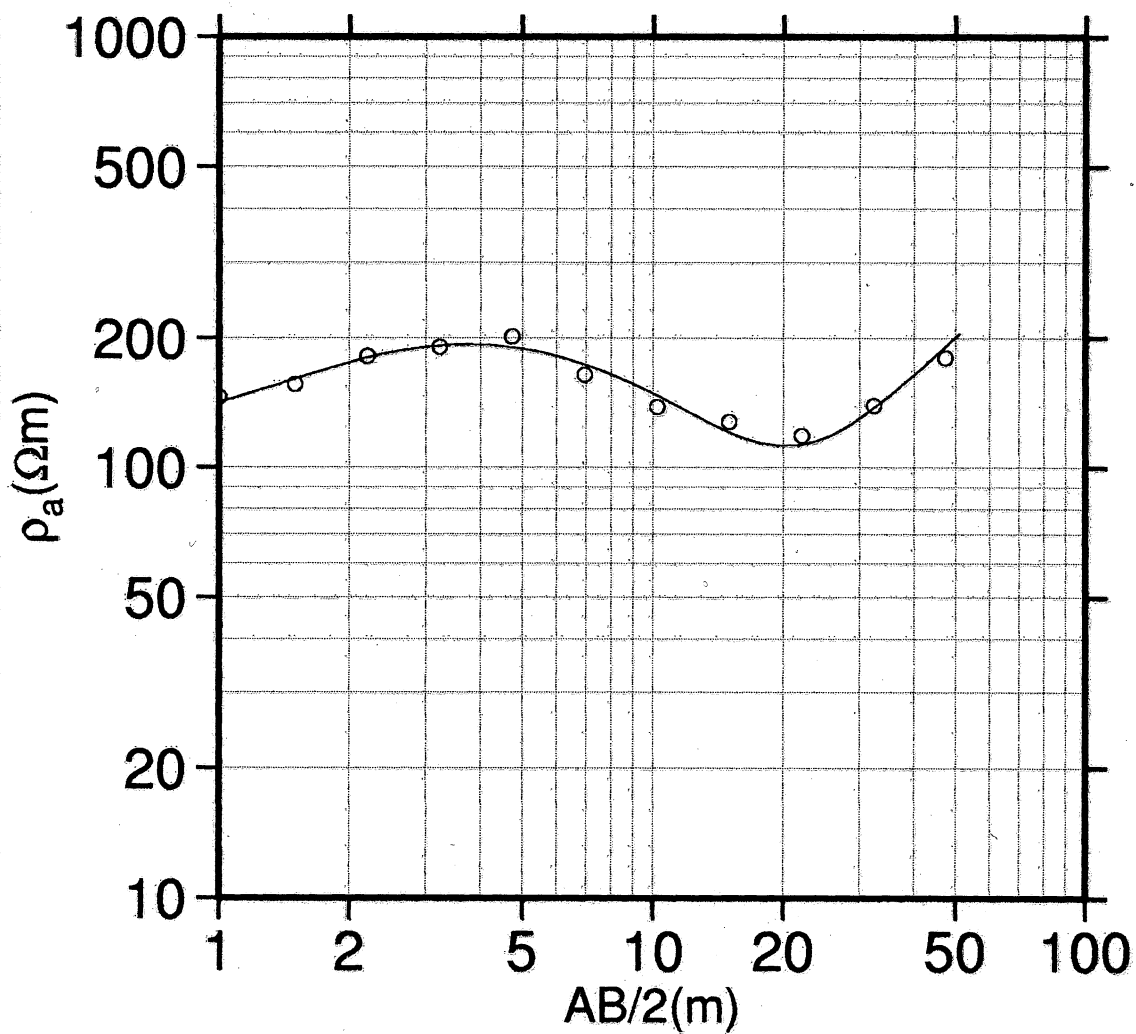
Camada	Res(ΩM)	ESPESSURA(M)	PROF.(M)
1	93	0,4	0
2	351	1,5	0,4
3	145	4,0	1,9
4	41	6,8	5,9
5	2040		12,7

Circulos: valores medidos

Curva: produzida pelo modelo

RFFSA - SEV10



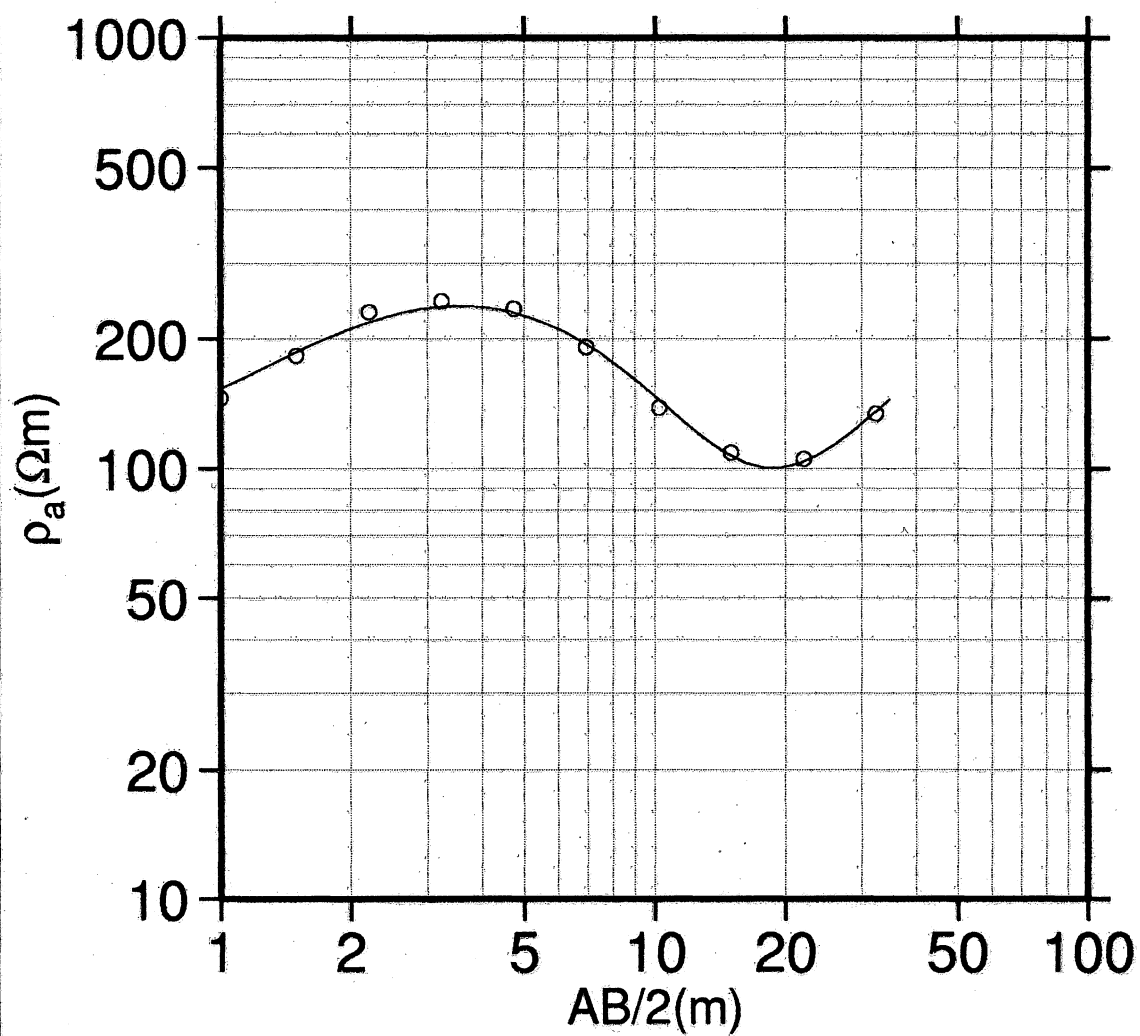


#### MODELO DE 5 CAMADAS

Camada	Res(Ωm)	Espessura(m)	Prof.(m)
1	119	0,6	0
2	256	1,6	0,6
3	155	4,8	2,2
4	40	7,2	7,0
5	2017		14,2

Circulos: valores medidos  
Curva: produzida pelo modelo

RFFSA - SEV11



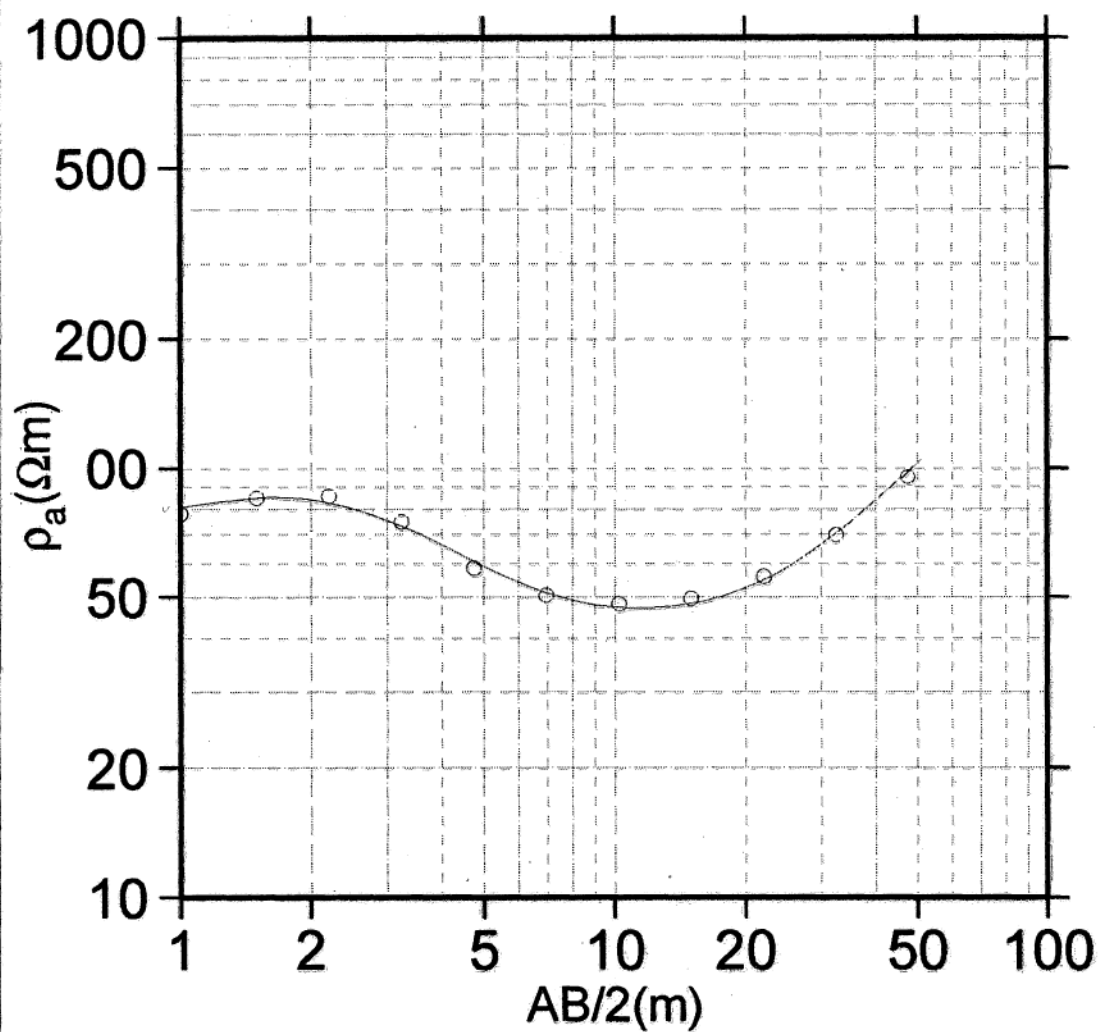
#### MODELO DE 5 CAMADAS

Camada	Res(Ωm)	Espessura(m)	Prof.(m)
1	106	0,5	0
2	409	1,6	0,5
3	134	3,6	2,1
4	38	7,1	5,7
5	2043		12,8

Circulos: valores medidos

Curva: produzida pelo modelo

RFFSA - SEV12



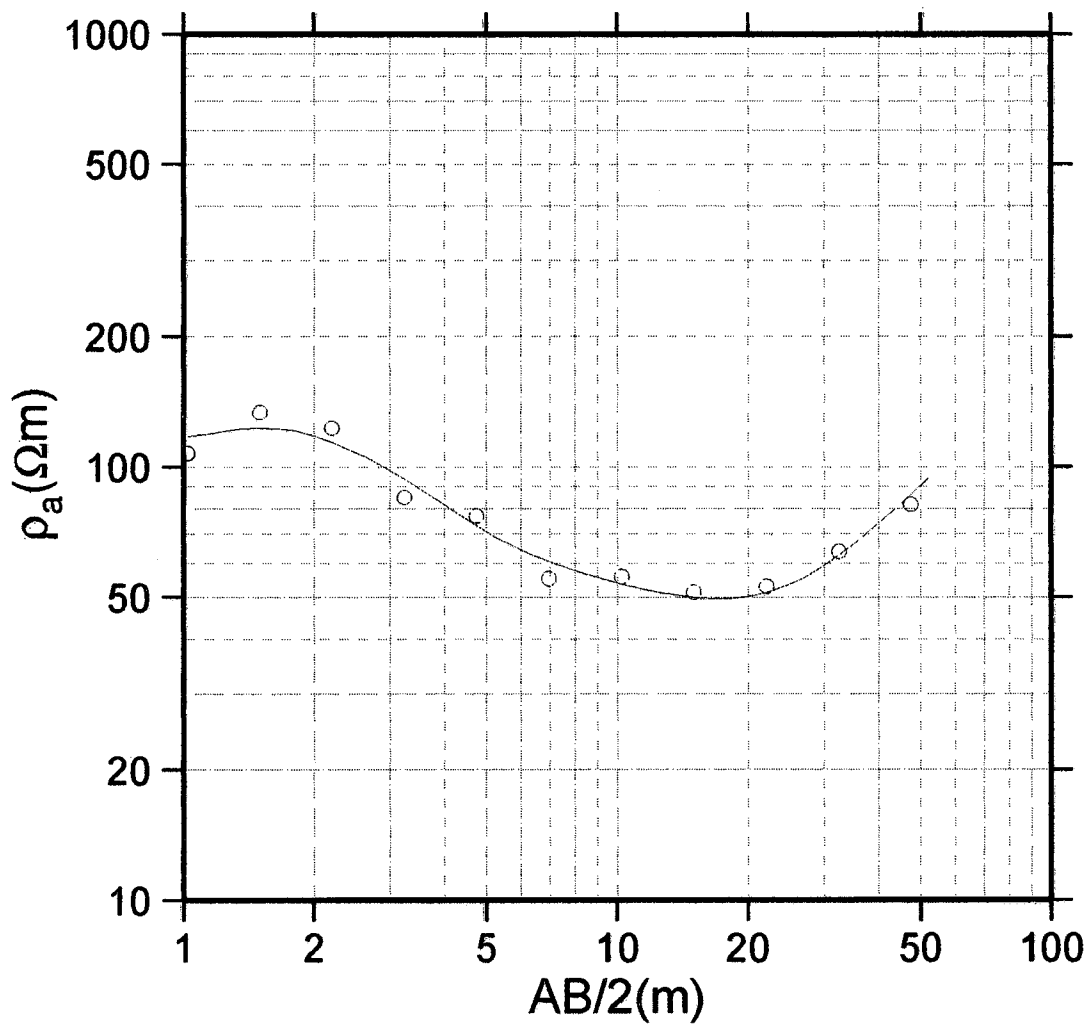
MODELO DE 4 CAMADAS

Camada	Res(ΩM)	ESPESSURA(M)	PROF.(M)
1	59	0,3	0
2	110	1,1	0,3
3	43	18,7	1,4
4	1966		20,1

Circulos: valores medidos

Curva: produzida pelo modelo

RFFSA - SEV13



#### MODELO DE 5 CAMADAS

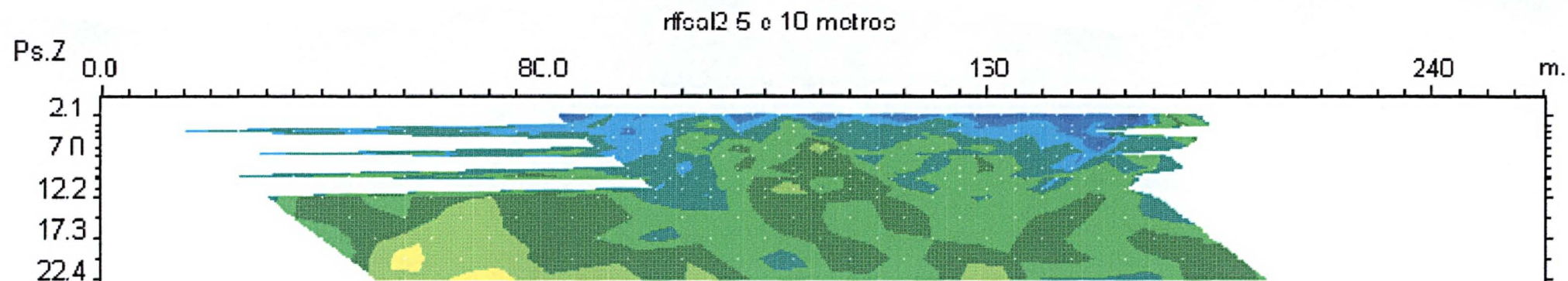
Camada	Res( $\Omega m$ )	ESPESSURA(M)	PROF.(M)
1	71	0,3	0
2	238	0,6	0,3
3	55	6,4	0,9
4	32	13,1	7,3
5	1961		20,4

Circulos: valores medidos  
Curva: produzida pelo modelo

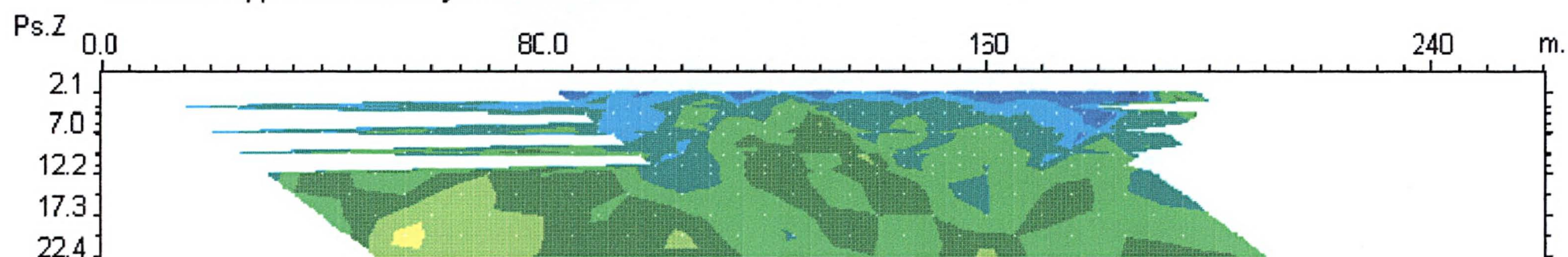
RFFSA - SEV14

## **ANEXO II**

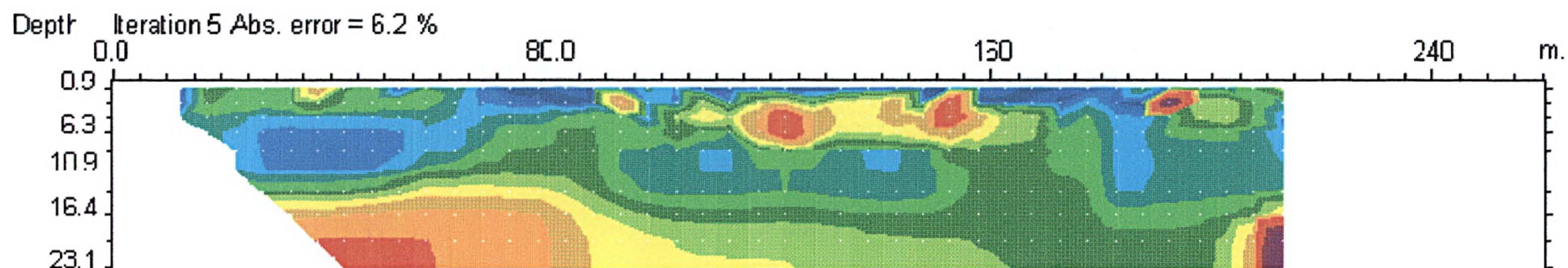
### **PSEUDO-SEÇÕES ORIGINAIS DE CAMINHAMENTO ELÉTRICO**



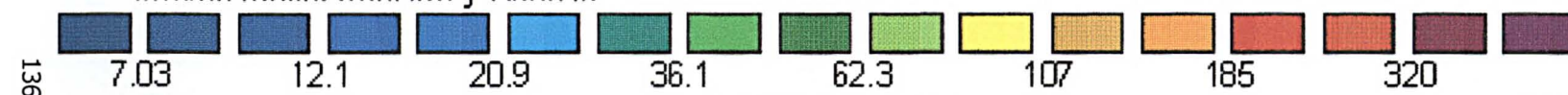
Measured Apparent Resistivity Pseudosection



Calculated Apparent Resistivity Pseudosection



Inverse Model Resistivity Section

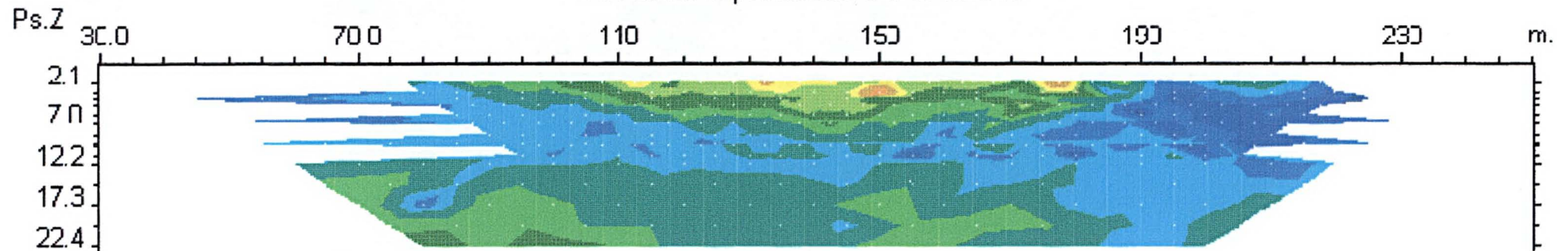


Resistivity in  $\Omega \cdot m$

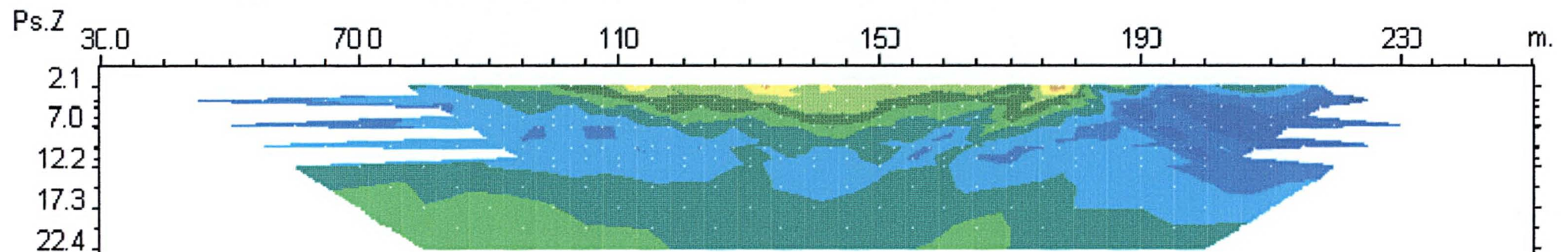
Unit electrode spacing 5.0 m.



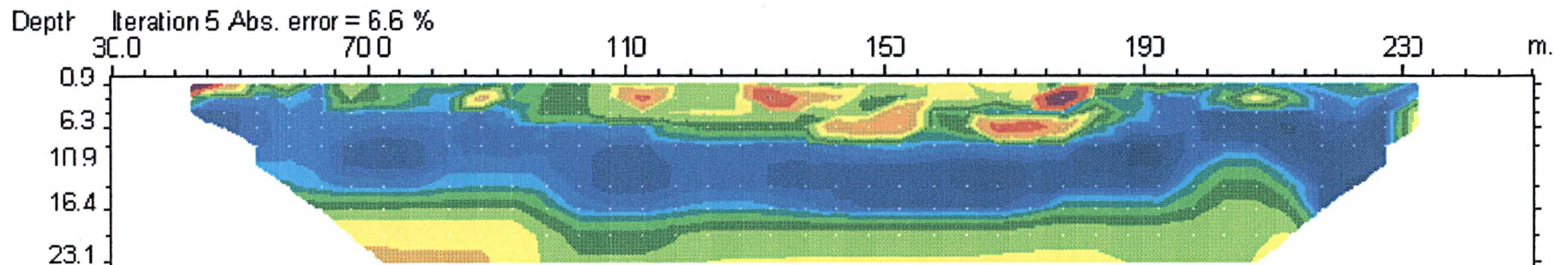
# RFFSAL3 espccamento 5 e 10 metros



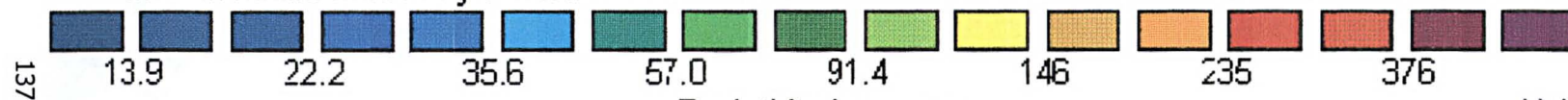
Measured Apparent Resistivity Pseudosection



Calculated Apparent Resistivity Pseudosection



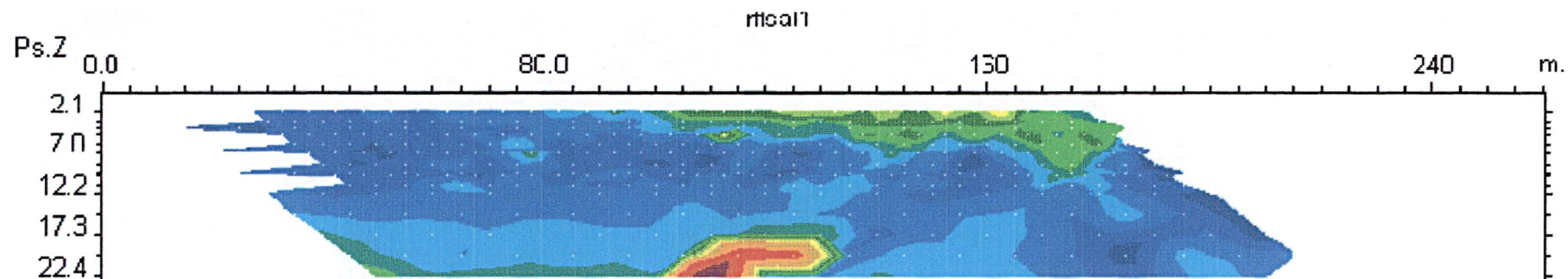
Inverse Model Resistivity Section



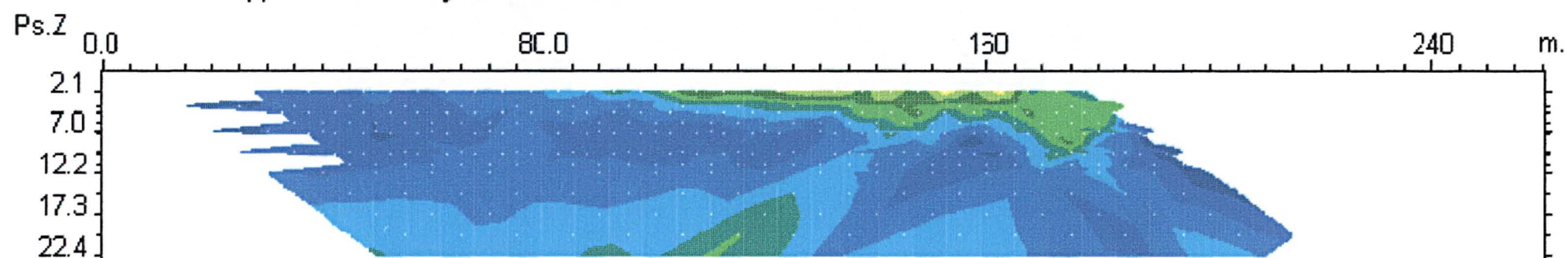
Resistivity in ohm.m

Unit electrode spacing 5.0 m.

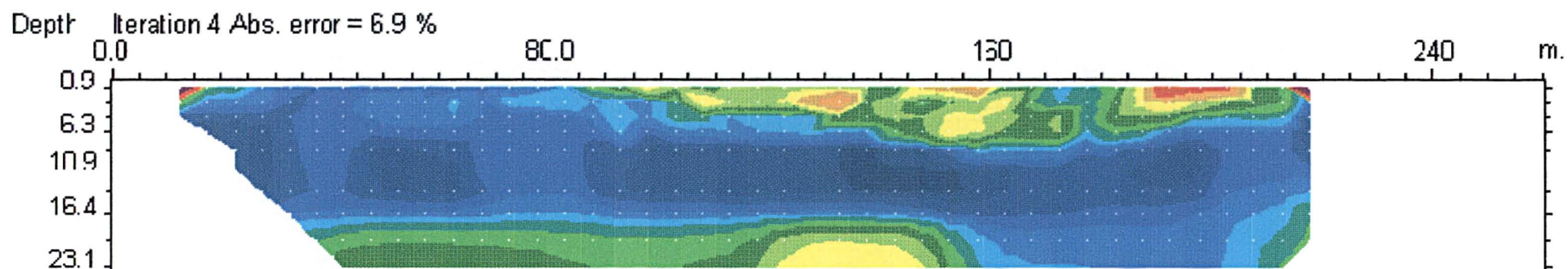




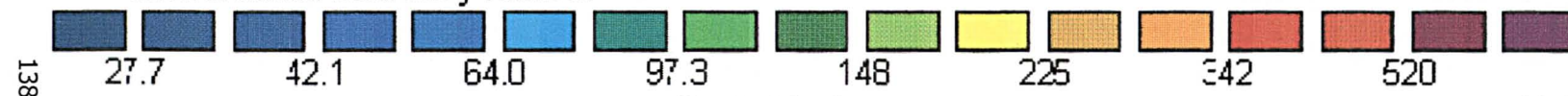
Measured Apparent Resistivity Pseudosection



Calculated Apparent Resistivity Pseudosection



Inverse Model Resistivity Section

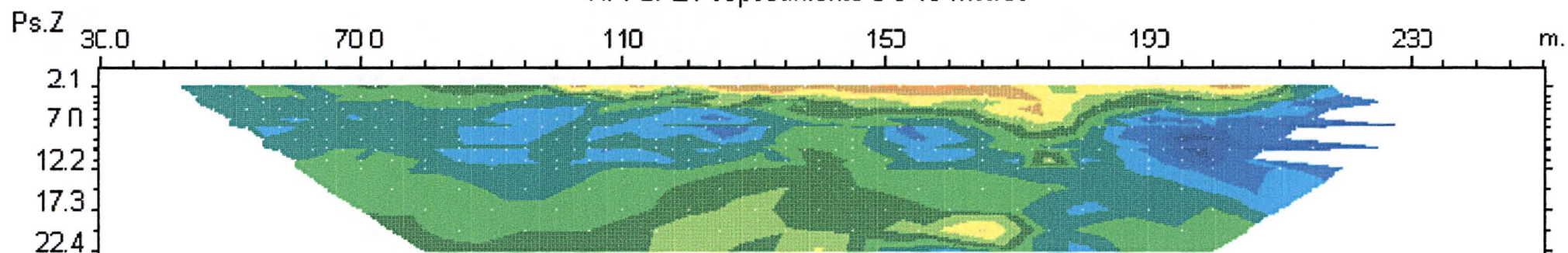


Resistivity in ohm.m

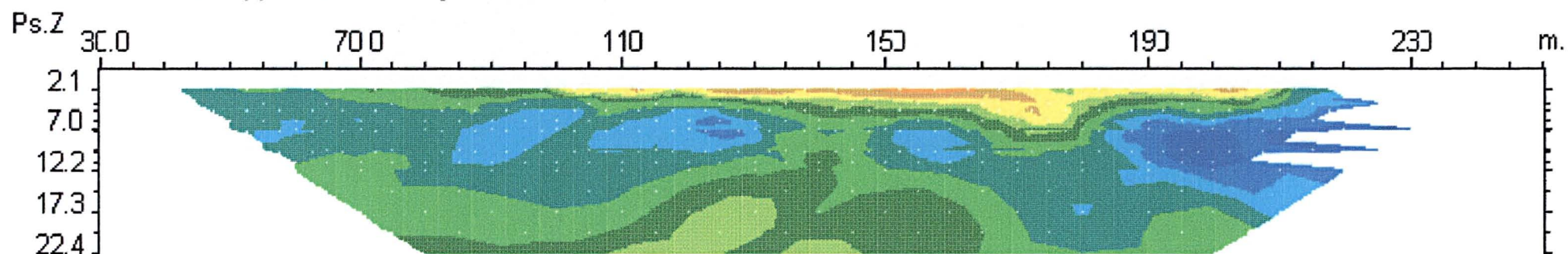
Unit electrode spacing 5.0 m.



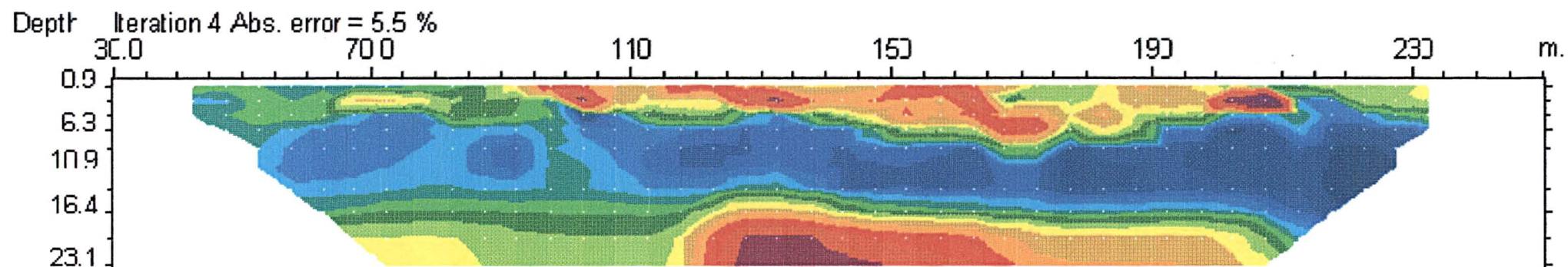
# RFFSAL4 espccamento 5 e 10 metros



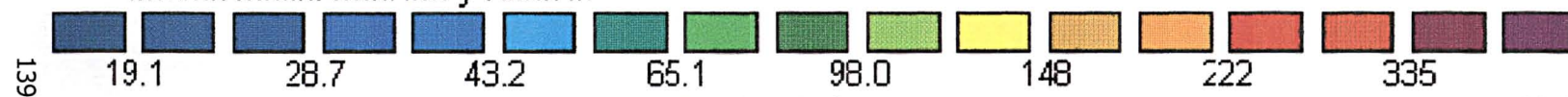
Measured Apparent Resistivity Pseudosection



Calculated Apparent Resistivity Pseudosection



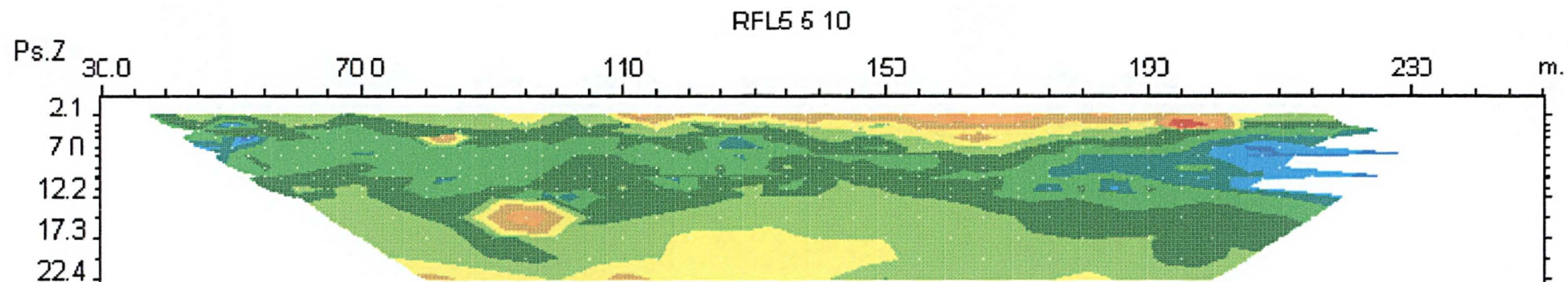
Inverse Model Resistivity Section



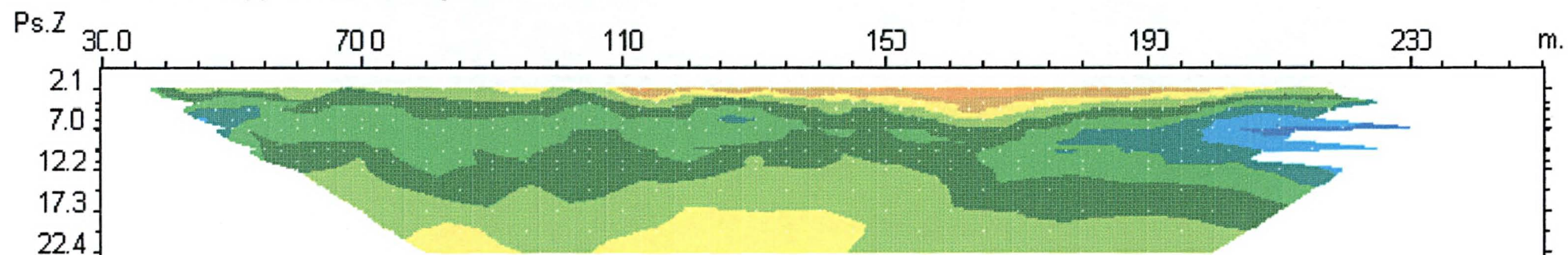
Resistivity in ohm.m

Unit electrode spacing 5.0 m.

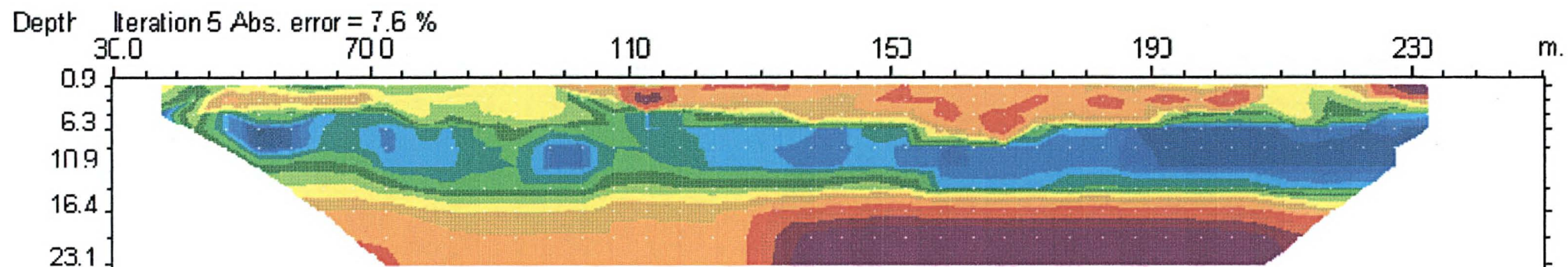




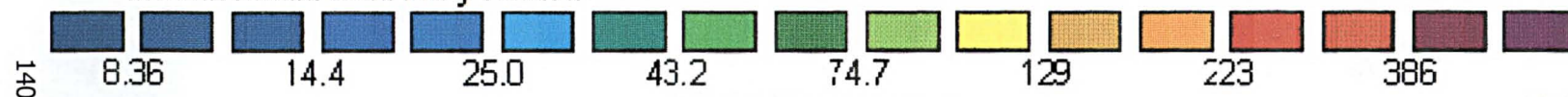
Measured Apparent Resistivity Pseudosection



Calculated Apparent Resistivity Pseudosection



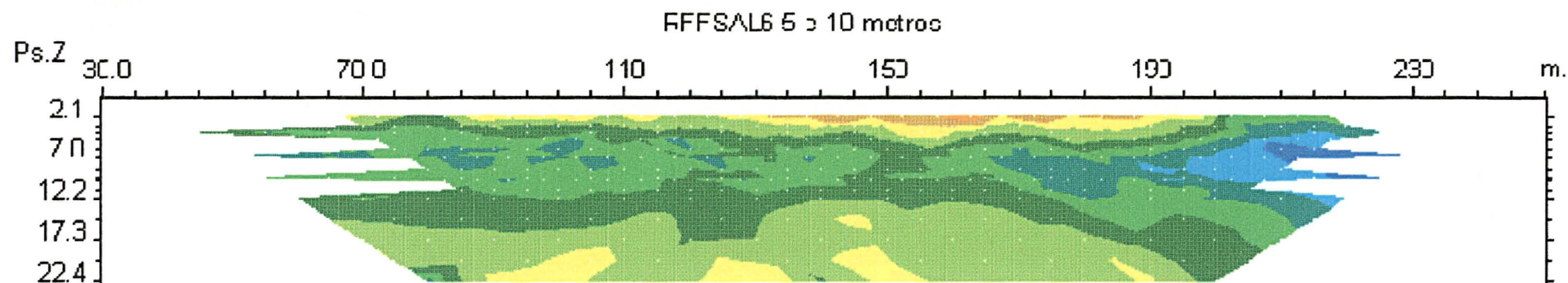
Inverse Model Resistivity Section



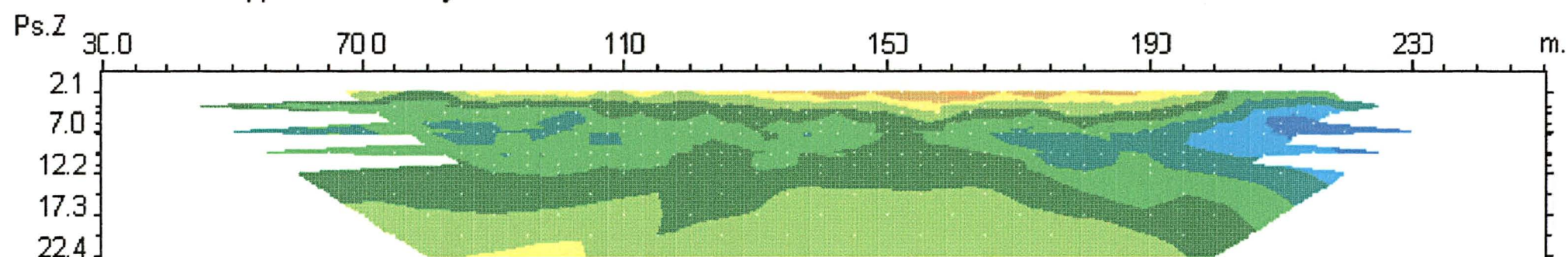
Resistivity in ohm.m

Unit electrode spacing 5.0 m.

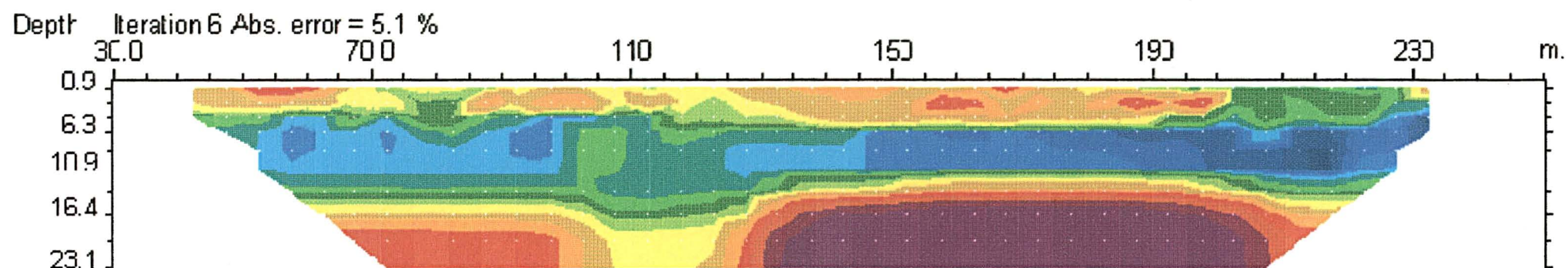




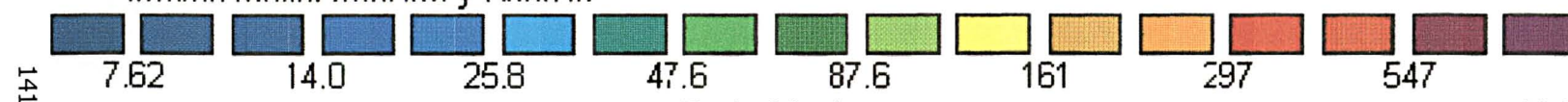
Measured Apparent Resistivity Pseudosection



Calculated Apparent Resistivity Pseudosection



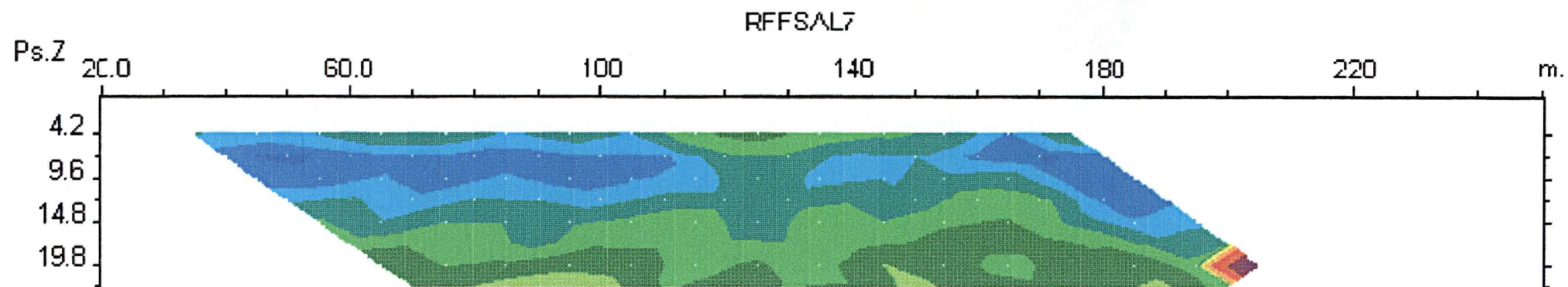
Inverse Model Resistivity Section



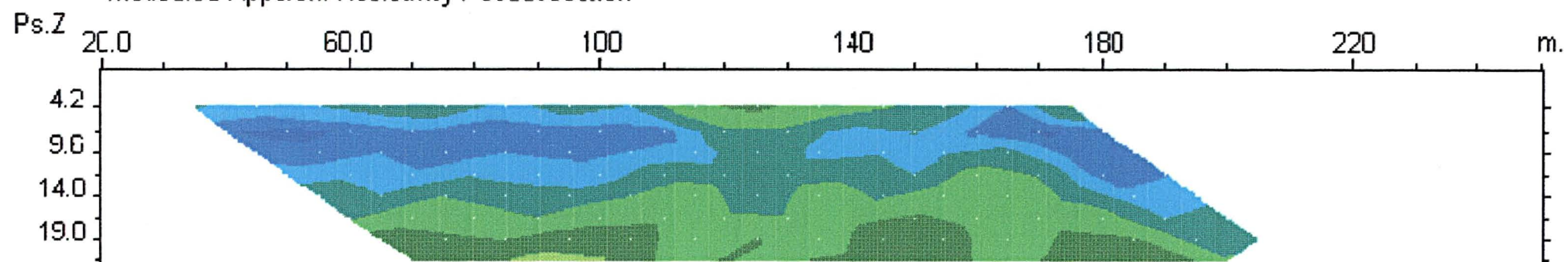
Resistivity in ohm.m

Unit electrode spacing 5.0 m.

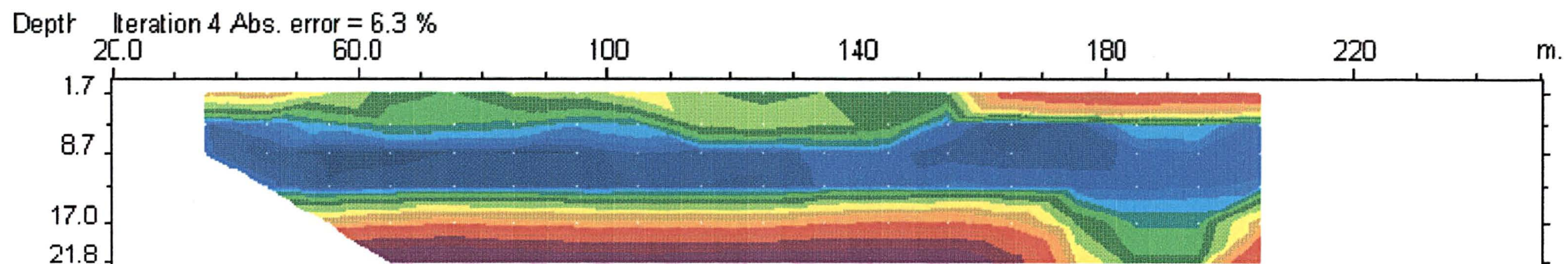




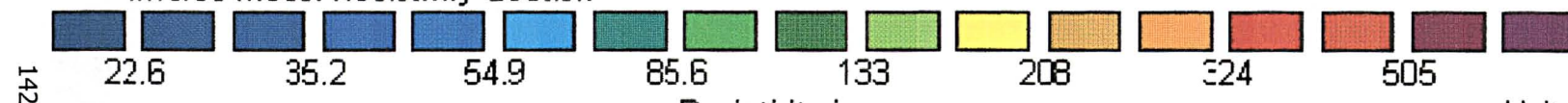
Measured Apparent Resistivity Pseudosection



Calculated Apparent Resistivity Pseudosection



Inverse Model Resistivity Section

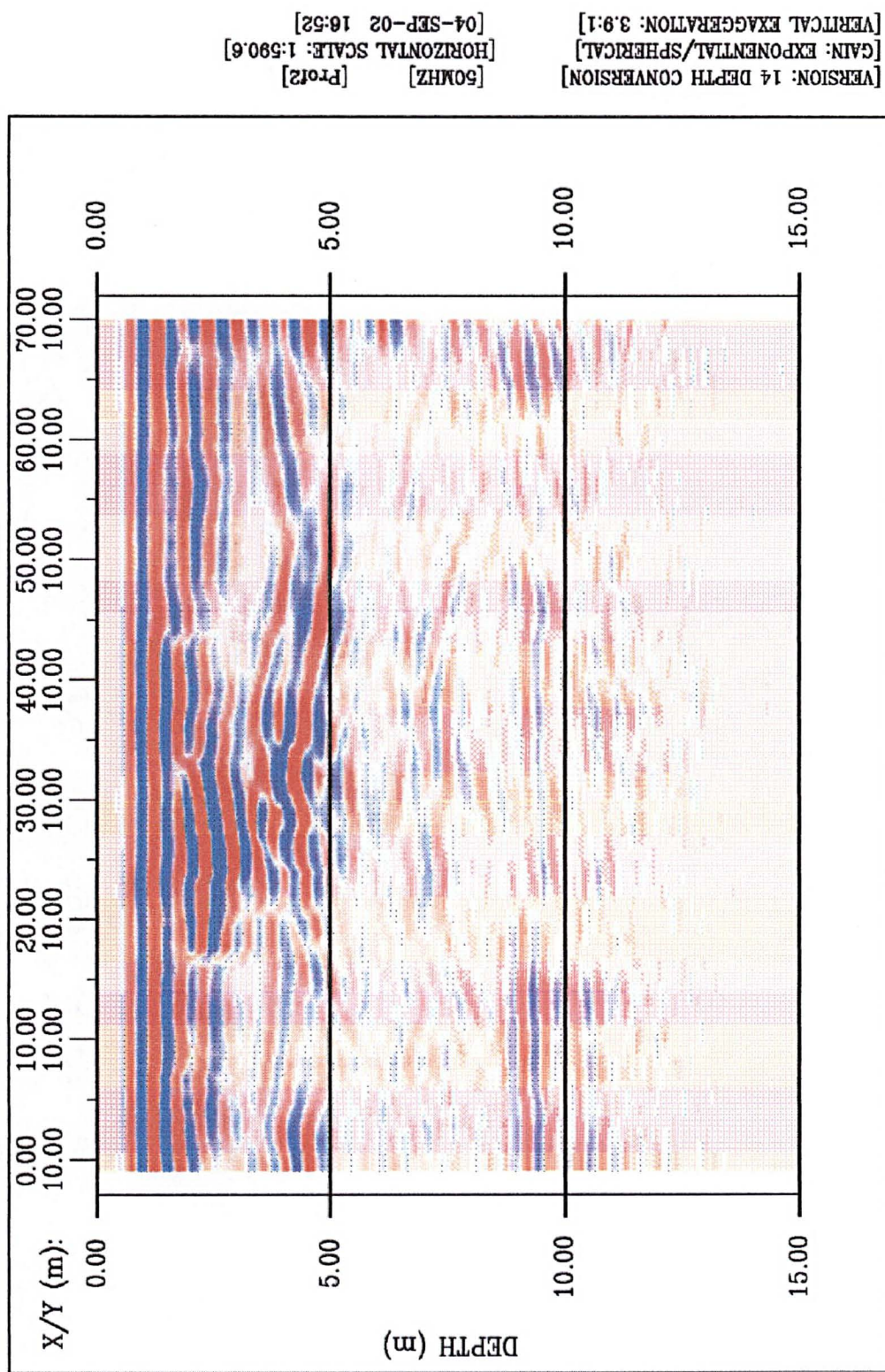


Resistivity in ohm.m

Unit electrode spacing 10.0 m.

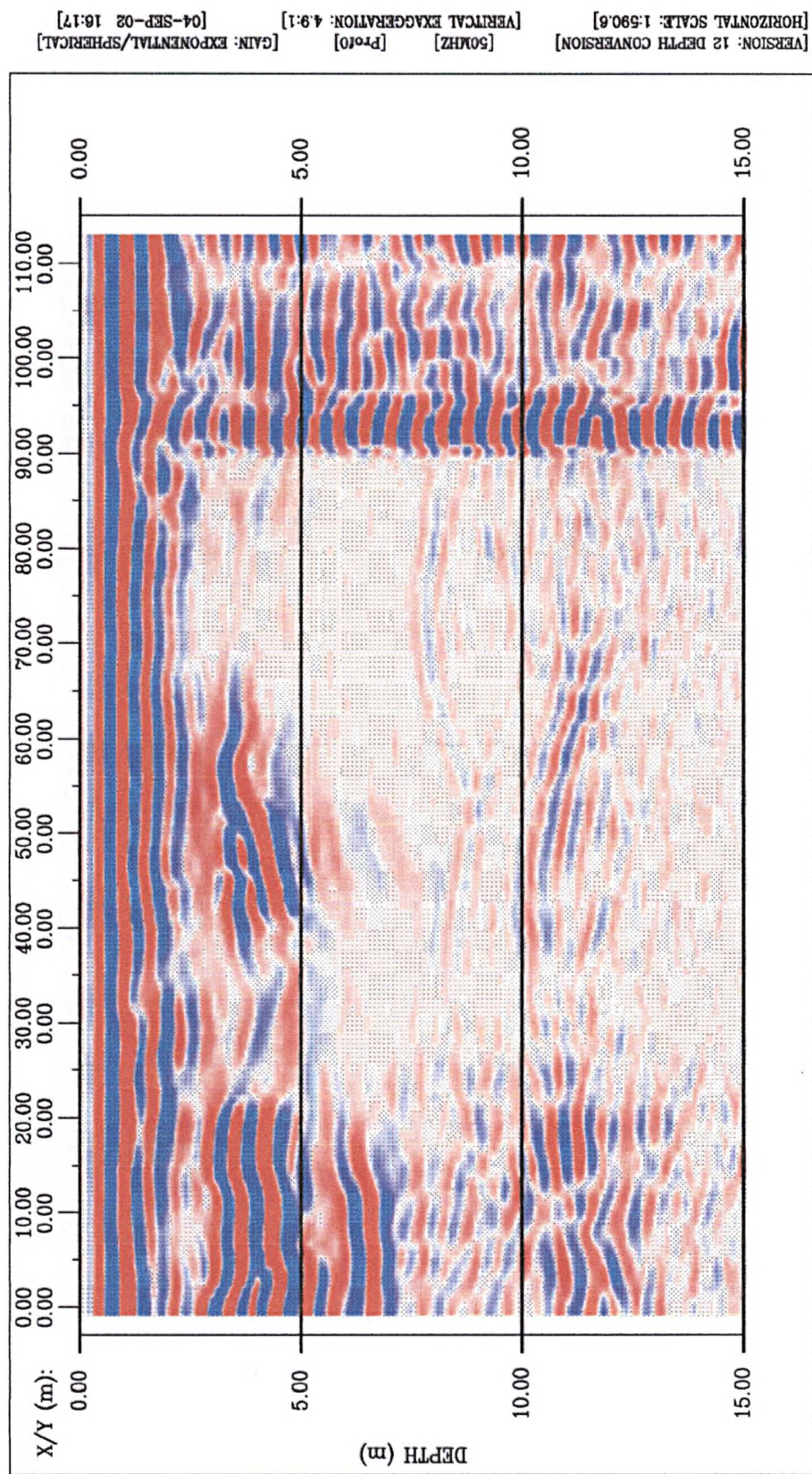
## **ANEXO III**

PERFIS GPR – FREQ. 50 MHz

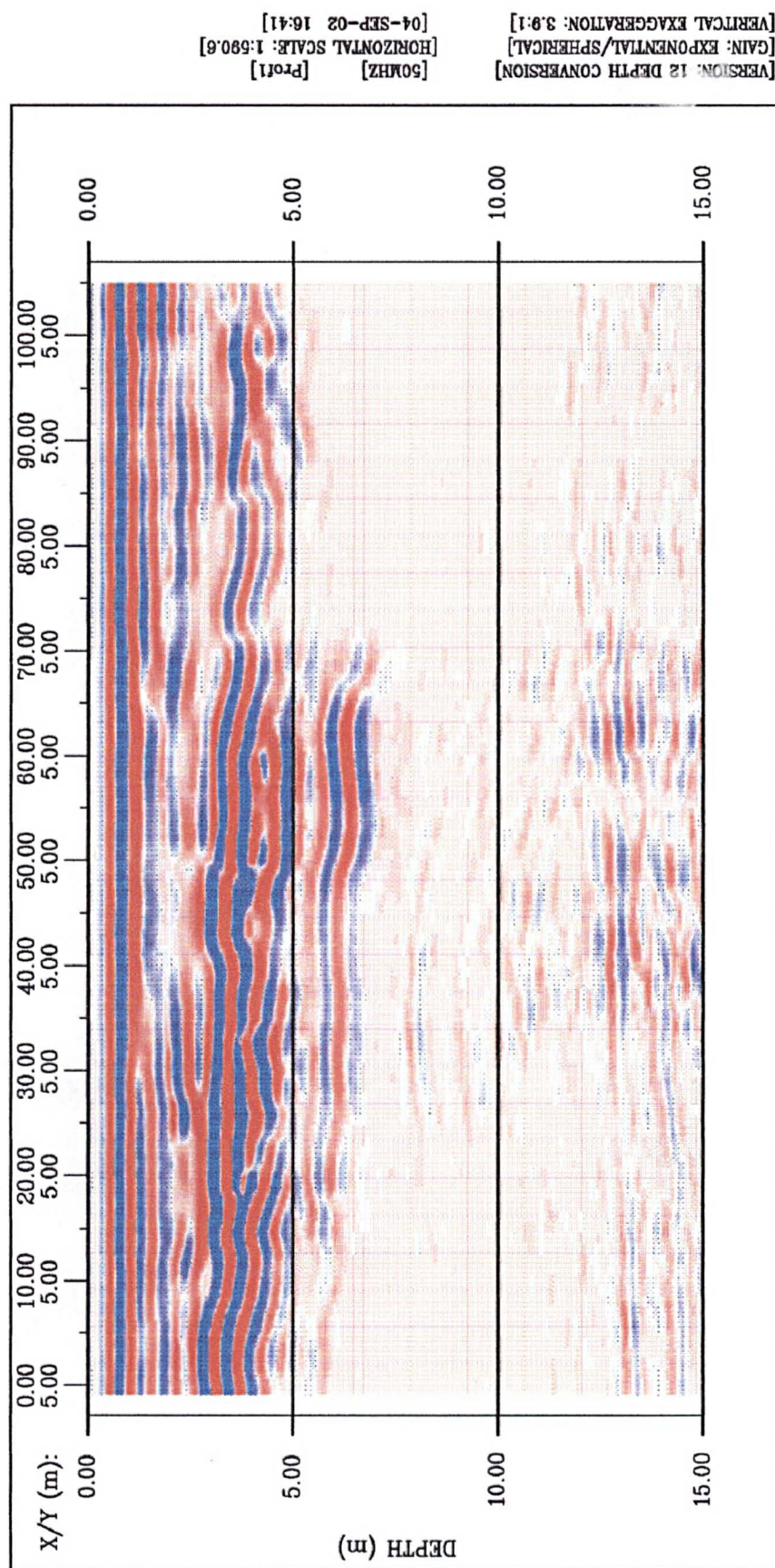


Perfil 2 - 50 Mhz





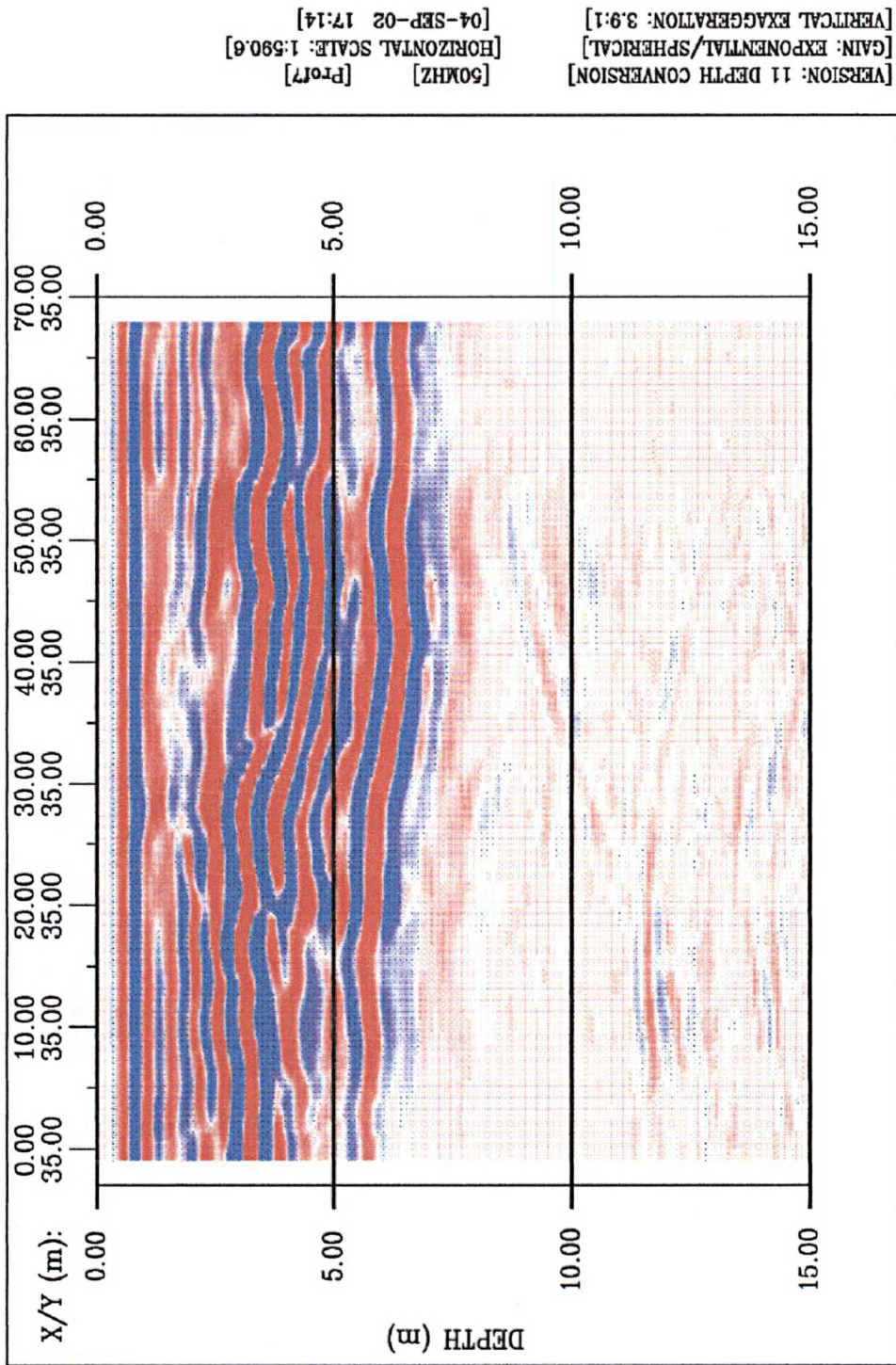
Perfil 3 - 50 Mhz

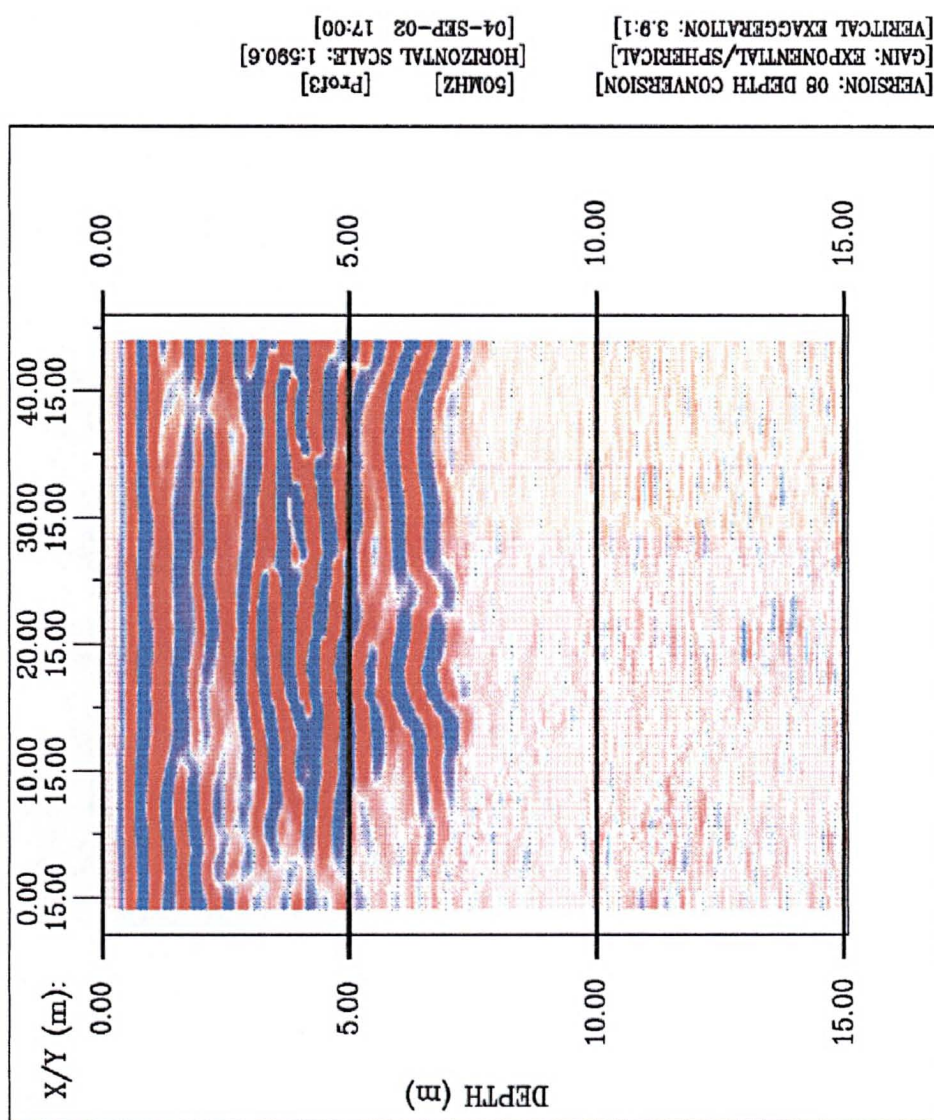


Perfil 4 - 50 Mhz



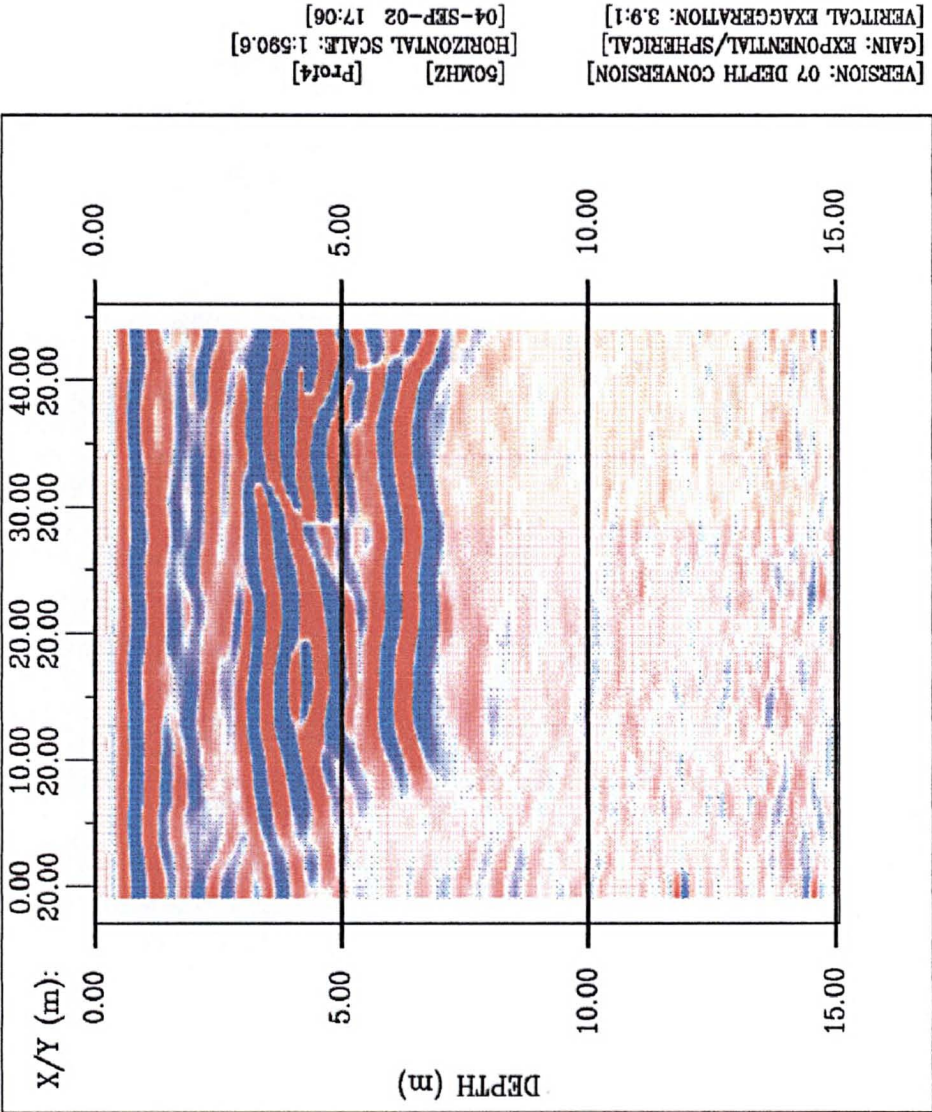
Perfil 5 – 50 Mhz





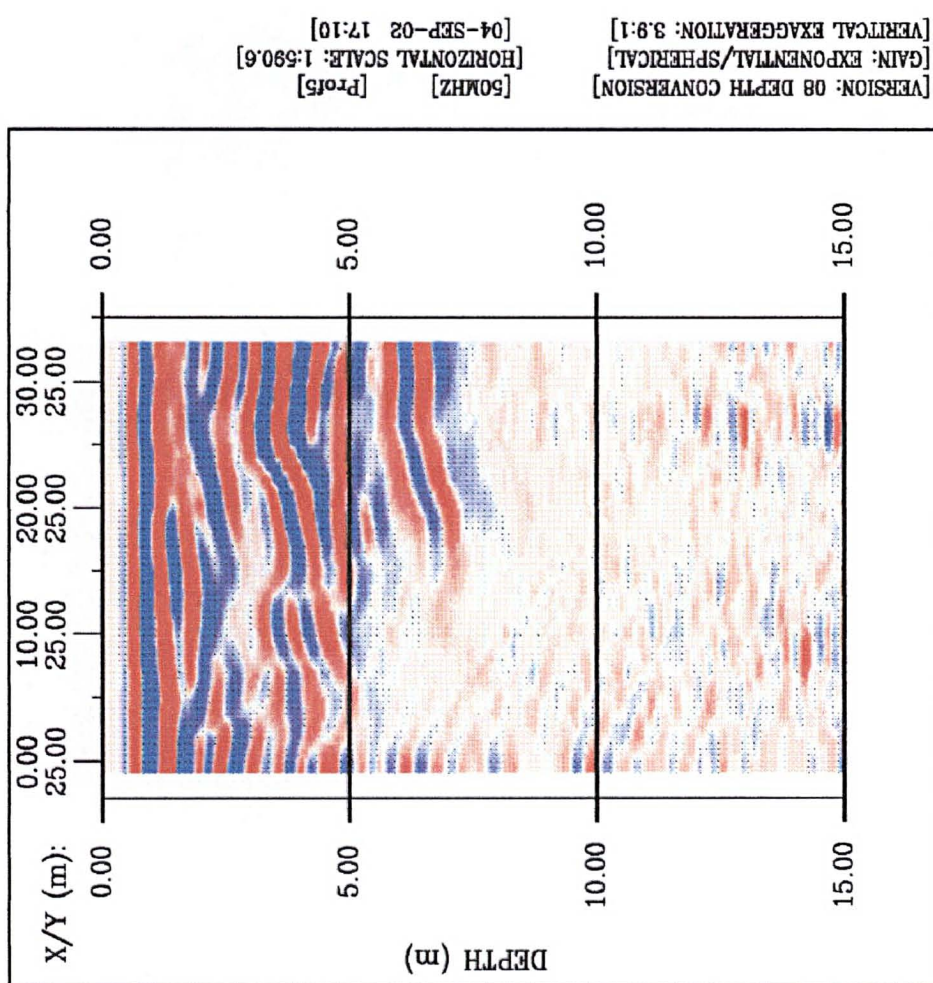
Perfil transversal de GPR - T1

Perfil transversal de GPR - T2





Perfil transversal de GPR - T3





## **ANEXO IV**

### **FOTOGRAFIAS**



visão geral da área com a vegetação alta



caixas separadoras e mancha de óleo visível em superfície

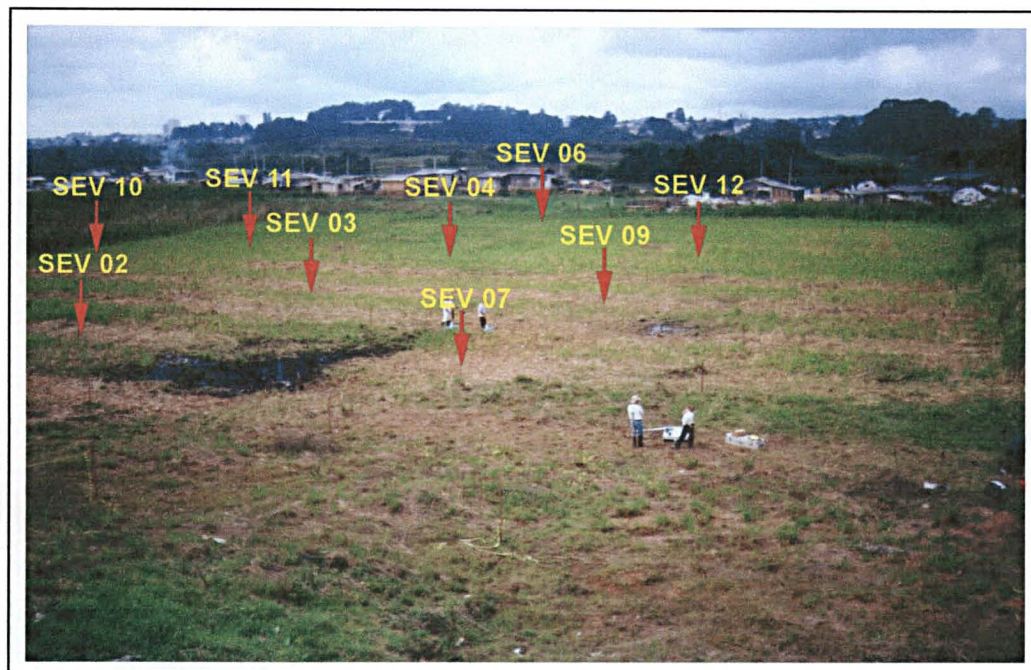


levantamento geoeletrico

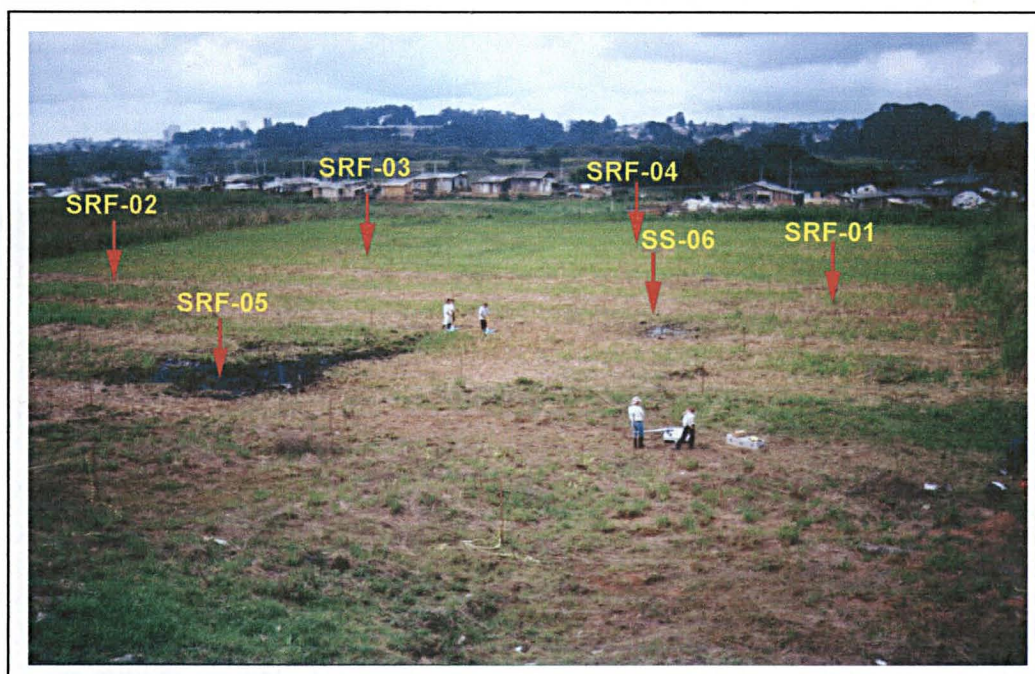


levantamento GPR



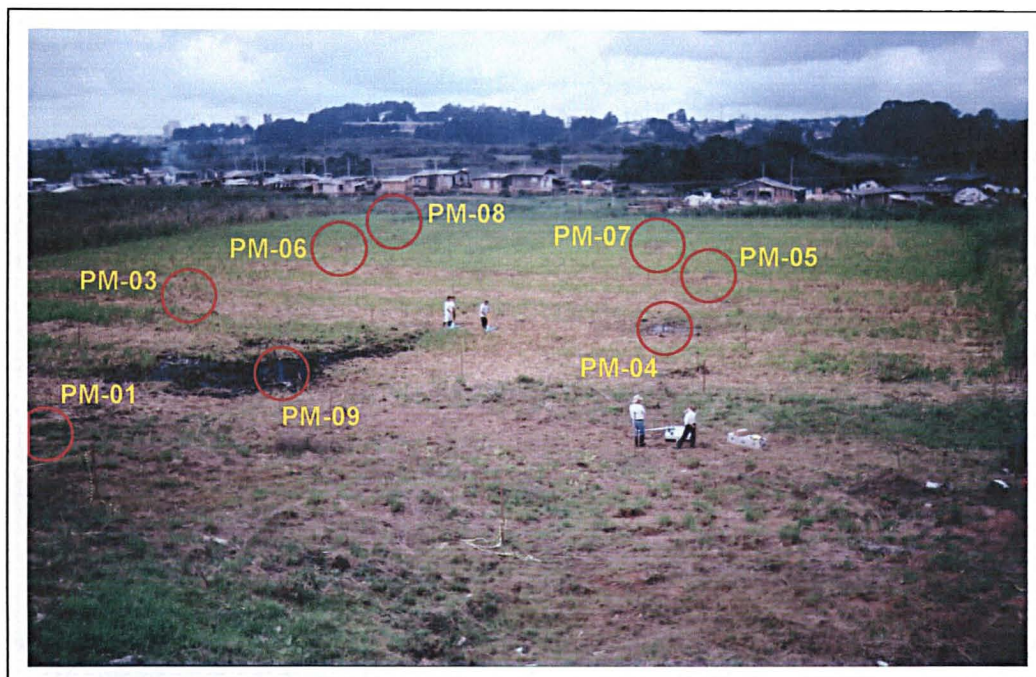


localização das SEV's – sondagens elétricas verticais

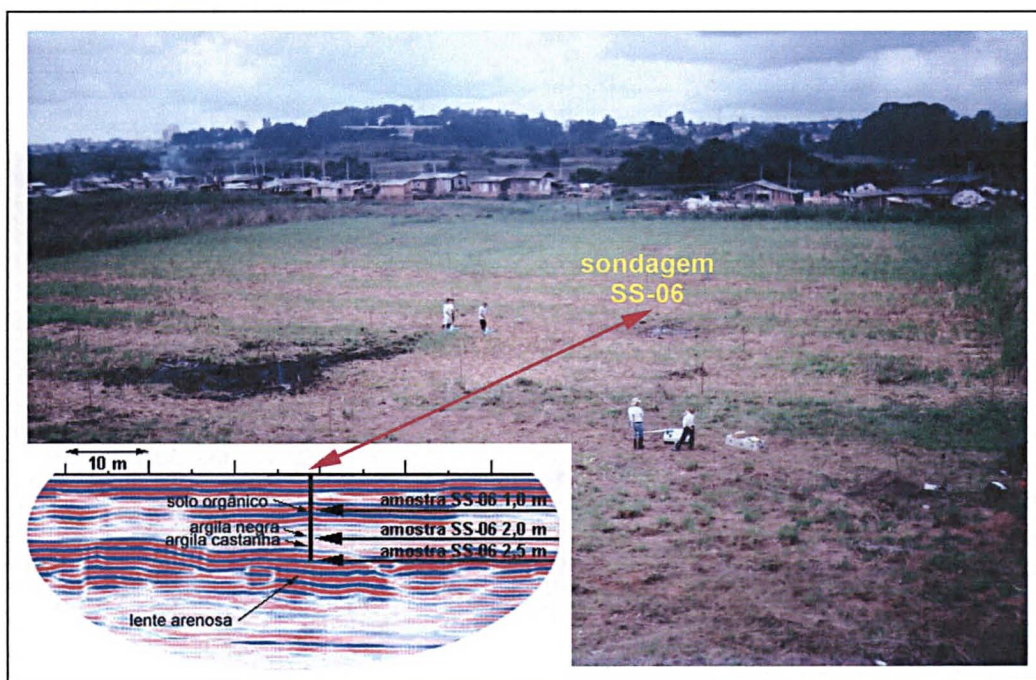


pontos de amostragem de solo





pontos de amostragem de água subterrânea



ponto da amostragem de solo SS-06 c/ destaque do Perfil GPR nº 5

## Referências bibliográficas

Acworth, I. 2001. The Electrical Method Compared with Resistivity Sounding and Eletromagnetic Profiling for Investigation in Areas of Complex Geology: A Case Study from Groundwater Investigation in a Weathered Crystalline Rock. *Environment. Exploration Geophysics*. Austrália. **32**:119-128.

Aquino, W.F. 2000. *Métodos Geofísicos Eletromagnéticos Aplicados ao Diagnóstico da Contaminação do Solo e das Águas Subterrâneas em Área de Infiltração de Resíduos Industriais*. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, Dissertação de Mestrado, 121p.

Archie, G.E. 1942. The Electrical Resistivity Log as an Aid in Determining Some Reservoir Characteristics. *Am. Inst. Eng. Trans.* **146**:54-61.

Atekwana, E.A.; Sauck, W.A.; Aal, G.Z.A; Werkema Jr.,D.D. 2002. Geophysical Investigation os Vadose Zone Conductivity Anomalies at a Hydrocarbon Contaminated Site: Implications for the Assessment of Intrinsic Bioremediation. *Journal of Environmental & Engineering Geophysics*. **7**:103-110.

Barber, W.B.; Morey, R. 1994. Radar Detection of Thin Layers of Hydrocarbon Contamination. In: GPR '94. Fifth International Conference on Ground Penetrating Radar, Kitchener, Ontario, Canada. *Anais*. **3**.1215-1228.

Borges, W.R. 2002. *Investigações Geofísicas na Borda da Bacia Sedimentar de São Paulo, utilizando-se de GPR e Eletrorresistividade*. Inst. Astronômico e Geofísico. Universidade de São Paulo, São Paulo, Dissertação de Mestrado, 153p.



Boulding, J.R. 1995. *Practical Handbook of Soil, Vadose Zone, and Ground-Water Contamination – Assessment, Prevention and Remediation*. Florida, Lewis Publishers, 984p.

Buselli, G.; Davis, G.B.; Barber, C.; Height, M.I.; Howard, S.H.D. 1992. The Application of Eletromagnetic and Electrical Methods to Groundwater Problems in Urban Environments. *Exploration Geophysics*. **23**:543-555.

Cabral, J. 2000. Hidrogeologia conceitos e aplicações. In CPRM (ed.). *Movimento das Águas Subterrâneas*. 2ª edição. 3.

Carcioni, J.M.; Marcak, H.; Seriani, G.; Padoan, G. 2000. GPR Modeling Study in a Contaminated Area of Krzywa Air Base (Poland). *Geophysics*. **65**:521-525.

Cassidy, D.P.; Werkema, Jr, D.D.; Sauck, W.; Atekwana, E.; Rossbach, S.; Duris, J. 2001. The Effects of LNAPL Biodegradation Products on Electrical Conductivity Measurements. *Journal of Environmental & Engineering Geophysics*. **6**:47-52.

Cetesb. 2002<sub>a</sub>. Material didático do curso “Prevenção e Atendimento a Vazamentos em Postos de Revenda”. São Paulo.

Cetesb. 2002<sub>b</sub>. Material didático do curso “Prevenção e Controle da Poluição do Solo e das Águas Subterrâneas”. São Paulo.

Código de Águas de 10 de Julho de 1934. Legislação Federal Brasileira.

COMEC – Coordenadoria da Região Metropolitana de Curitiba. 1985. (Curitiba). Foto Aérea. Escala 1:8.000.

Corwin, R.F. 1990. The Self-Potential Method for Environment and Engineering Applications. In S.H.Ward (ed.) *Geotechnical and Environmental Geophysics – Investigation in Geophysics nº5*, Oklahoma, Society of Exploration Geophysicists - USA, 1:127-145.

Daily, W.; Ramirez, A.L. 2000. Electrical Imaging of Engineered Hydraulic Barriers. *Geophysics*. **65**:83-94.

Daniels, J.J.; Roberts, R.L. 1994. Ground Penetrating Radar for Geotechnical Applications. Geophysical Characterization of Sites. In XIII ICSMFE. New Delhi, India. 1-13.

Daniels, J.J.; Roberts, R.; Vendl, M. 1995. Ground Penetrating Radar for the Detection of Liquid Contaminants. *Applied Geophysics*. **33**:195-207.

Daniels, J.J.; Grumman, D.L.; Vendl, M. 1997. Coincident Antenna Three-Dimensional GPR. *Journal of Environmental & Engineering Geophysics*. **2**:1-9.

Daniels, J. 2000. Ground-penetrating Radar Detects Subsurface Liquid Waste Less Invasively than Drilling or Coring. *Industrial Wastewater*. USA. July/August:16-17.

Davis, J.L.; Annan, A.P. 1989. Ground-Penetrating Radar for High Resolution Mapping of Soil and Rock Stratigraphy. *Geophysical Prospecting*. **37**:531-551.

Dehaini, J. 2001. *Detecção da Pluma de Contaminação de Hidrocarbonetos em Sub-superfície pelo Método de Radar de Penetração*. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, Tese de Doutorado, 100p.

EPA - United States Environmental Protection Agency. 1987. *Soil-Gas and Geophysical Techniques for Detection of Subsurface Organic Contamination*. 5-16.

EPA - United States Environmental Protection Agency. 1989. *Corrective Action: Technologies and Applications*. 6-14.

EPA - United States Environmental Protection Agency. 1993. *Subsurface Characterization and Monitoring techniques – A Desk Reference*. I:1-21/1-24.

EPA - United States Environmental Protection Agency. 1996. *How to Effectively Recover Free Product at Leaking Undergrounds Storage Tank Sites*. III-1/III-4.

EPA - United States Environmental Protection Agency. 1997. *Expedited Site Assessment Tools For Underground Storage Tank Sites*. III-4/III-8.

EPA - United States Environmental Protection Agency. 2000. *Innovations in Site Characterization: Geophysical Investigation at Hazardous Waste Sites*. 51-63.

Filho, J.M. 2000. Hidrogeologia conceitos e aplicações. In CPRM (ed.). *Água Subterrânea: Histórico e Importância. Ocorrência das Águas Subterrâneas*. 2ª edição. 1-2.

Gögh, É.; Pattantyus, A.; Prónay, Zs. 1994. Application of Ground Penetrating Radar for Site Characterization. In XIII ICSMFE. New Delhi, India. 69-79.

Greenhouse, J.; Gudjurgis, P. 1995. An introduction to applications of surface geophysics in environmental investigations. *EEGS Short Course*. Orlando, Florida, USA.

Grumman, D.L., Jr.; Daniels, J. 1995. Experiments on the Detection of Organic Contaminants in the Vadose Zone. *Journal of Environmental & Engineering Geophysics*. 0:31-38.

Hendersen, R. 1993. Environmental Geophysics – Its Particular Aspects and General Lessons to be Learbed from its Practise. *Preview – ASEG*. 46:41.

Iterpex . Manual do Programa “Gradix” de Pós-processamento de Radargramas GPR. USA.

IPPUC – Instituto de Pesquisa e Planejamento Urbano de Curitiba. 1990. (Curitiba). Foto Aérea. Escala 1:8.000.

IPPUC – Instituto de Pesquisa e Planejamento Urbano de Curitiba. 1999. (Curitiba). Foto Aérea. Escala 1:8.000.

IPPUC – Instituto de Pesquisa e Planejamento Urbano de Curitiba. 2001. Mapa de Arruamento. Escala 1:20.000.

Lima, O.A.L.; Porsani, M.J. 1994. Monitoramento Geo-Elétrico da Contaminação Aqüífera no Pólo Petroquímico de Camaçari, Bahia. *Revista Brasileira de Geofísica*. **12(2)**:147-161.

Loke, M.H. 1999. Electrical Imaging Surveys for Environment and Engineering Studies: *A practical guide to 2D and 3D surveys*. Malaysia, 57p.

Marin, L.E.; Steinich, B.; Jaglowski, D.; Barcelona, M.J. 1998. Hydrogeologic Site Characterization Using Azimutal Resistivity Surveys. *Journal of Environmental & Engineering Geophysics*. **3**:179-184.

Mazác, O.; Benes, L.; Landa, I.; Maskova, A. 1990. Determination of the Extent of Oil Contamination in Groundwater bu Goeletrical Methods. In S.H.Ward (ed.) *Geotechnical and Environmental Geophysics – Investigation in Geophysics nº5*, Oklahoma, Society of Exploration Geophysicists - USA, **2**:107-112.

Merrick, N.P. 1997. A New Resolution Index for Resistivity Electrode Arrays. *Exploration Geophysics*. **28**:106-109.

Osella, A.; de la Vega, M.; Lascano, E. 2002. Characterization of Contaminant Plume Due to a Hydrocarbon Spill Using Goelectrical Methods. *Journal of Environmental & Engineering Geophysics*. **7**:78-87.

Ramirez, A.L.; Daily, W.D.; Newmark, R.L. 1995. Electrical Resistance Tomography for Steam Injection Monitoring and Process Control. *Journal of Environmental & Engineering Geophysics*. **0**:39-51.

Resolução CONAMA nº 273 de 17 de Janeiro de 2001.

Rigoti, A.; Crossley, D.J. 1987. Reduction of Ambiguity in Geoelectric Models Using Multiple Data Sets. *Revista Brasileira de Geofísica*. **5**:29-41.

Rosa F<sup>o</sup>., E.; Paranhos F<sup>o</sup>.,A.C.; dos Prazeres F<sup>o</sup>.,H.J.; Valaski, Z.F. 1996. Considerações sobre aspectos físicos e hidráulicos da Formação Guabirota, na região nordeste de Curitiba. *Boletim Paranaense de Geociências*. **44**:35-50.

Santamarina, J.C. 1994. An Introduction to Geotomography. In XIII ICSMFE. New Delhi, India. 35-43.

Santamarina, J.C.; Fam, M. 1997. Dielectric Permittivity of Soils Mixed with Organic and Inorganic Fluids (0.02 GHz to 1.30 GHz). *Journal of Environmental & Engineering Geophysics*. **2**:37-51.

Sauk, W. 1997. An Integrated Model to Explain the High Conductivity Below LNAPL Plumes in Granular Sediments. In Congr. Intern. da Soc. Brás. de Geofísica, 5, São Paulo, *Resumos Expandidos*. 508-510.

Schianetz, B. 1999. *Passivos Ambientais: levantamento histórico; avaliação da periculosidade; ações de recuperação*. Curitiba, SENAI/ABES, 200p.

Sracek, O. 2000. Material didático do curso "Bio-remediação de Aquíferos: Conceitos Básicos e Aplicações Práticas". São Paulo.



Sracek, O. 2002. Material didático do curso "Contaminação de Águas Subterrâneas por Vazamentos de Postos de Combustível: avaliação de atenuação natural de compostos orgânicos". Rio de Janeiro.

Strieder, A.J. 2000. O Geo-Radar (GPR) e sua Aplicação em Investigações do Subsolo. Curso de Extensão - UFPR. Curitiba.

Van Dam, R.L.; Schlager, W.; Dekkers, M.J.; Huisman, J.A. 2002. Iron Oxides as a Cause of GPR Reflections. *Geophysics*. **67**:536-545.

White, R.M.S.; Collins, S.; Denne, R.; Hee, R.; Brown, P. 2001. A New Survey Design for 3D IP Inversion Modelling at Copper Hill. *Exploration Geophysics*. **32**:152-155.

Whiteley, R.; Jewell, C. 1992. Geophysical techniques in contaminated lands assessment – do they deliver?. *Exploration Geophysics*. **23**:557-565.

Whiteley, R. 1995. Environmental Geophysics: Challenges and Perspectives. *Exploration Geophysics*. **25**:189-196.

Wood, W.; Palmer, D. 2000. The application of mise-à-la-masse and electrical imaging to the direction of pipe source pollution from leaking sewers. *Exploration Geophysics*. **31**:515-519.